Máquinas Eléctricas

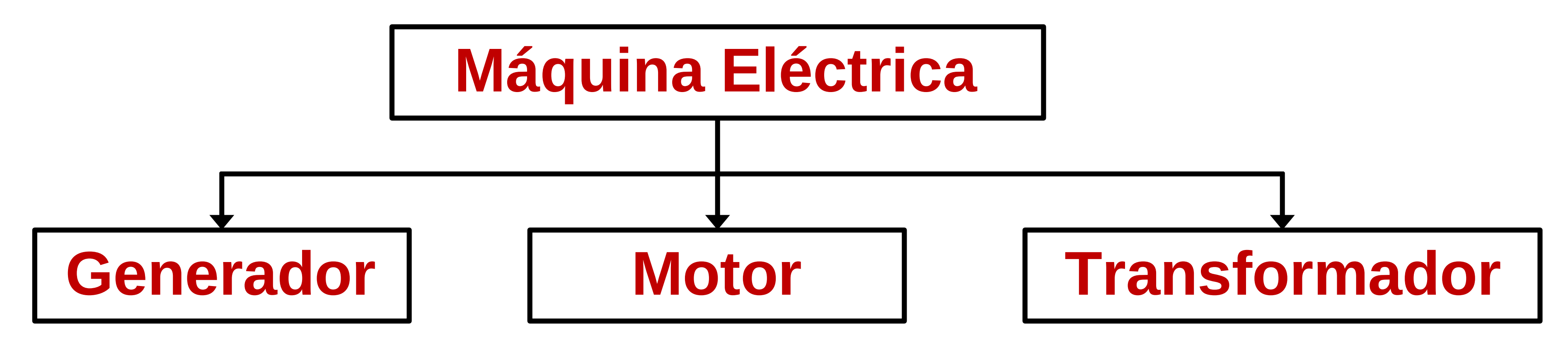
Principios generales de las Máquinas Eléctricas

Definición de Máquina Eléctrica

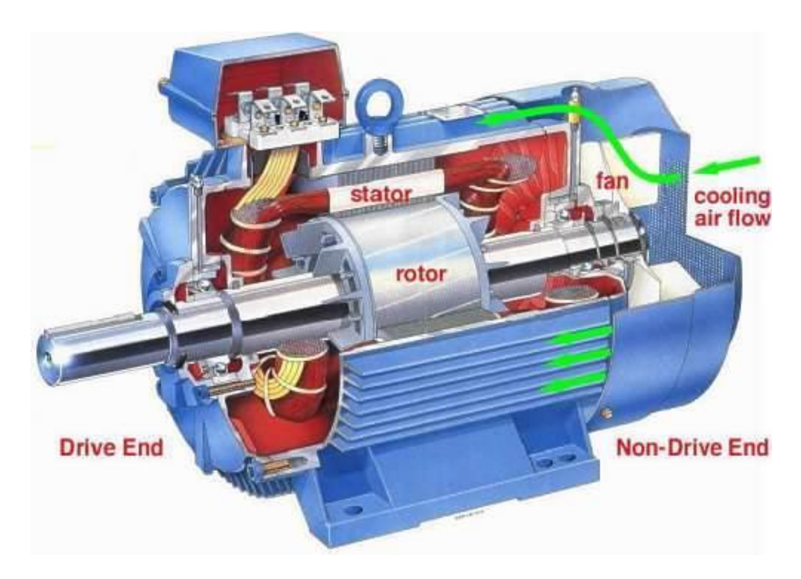
Máquinas Eléctricas es un mecanismo destinado a la transformación de energía de una forma a otra, una de las cuales es eléctrica.

Clasificación de Máquinas Eléctricas

Desde un punto de vista estrictamente energético:



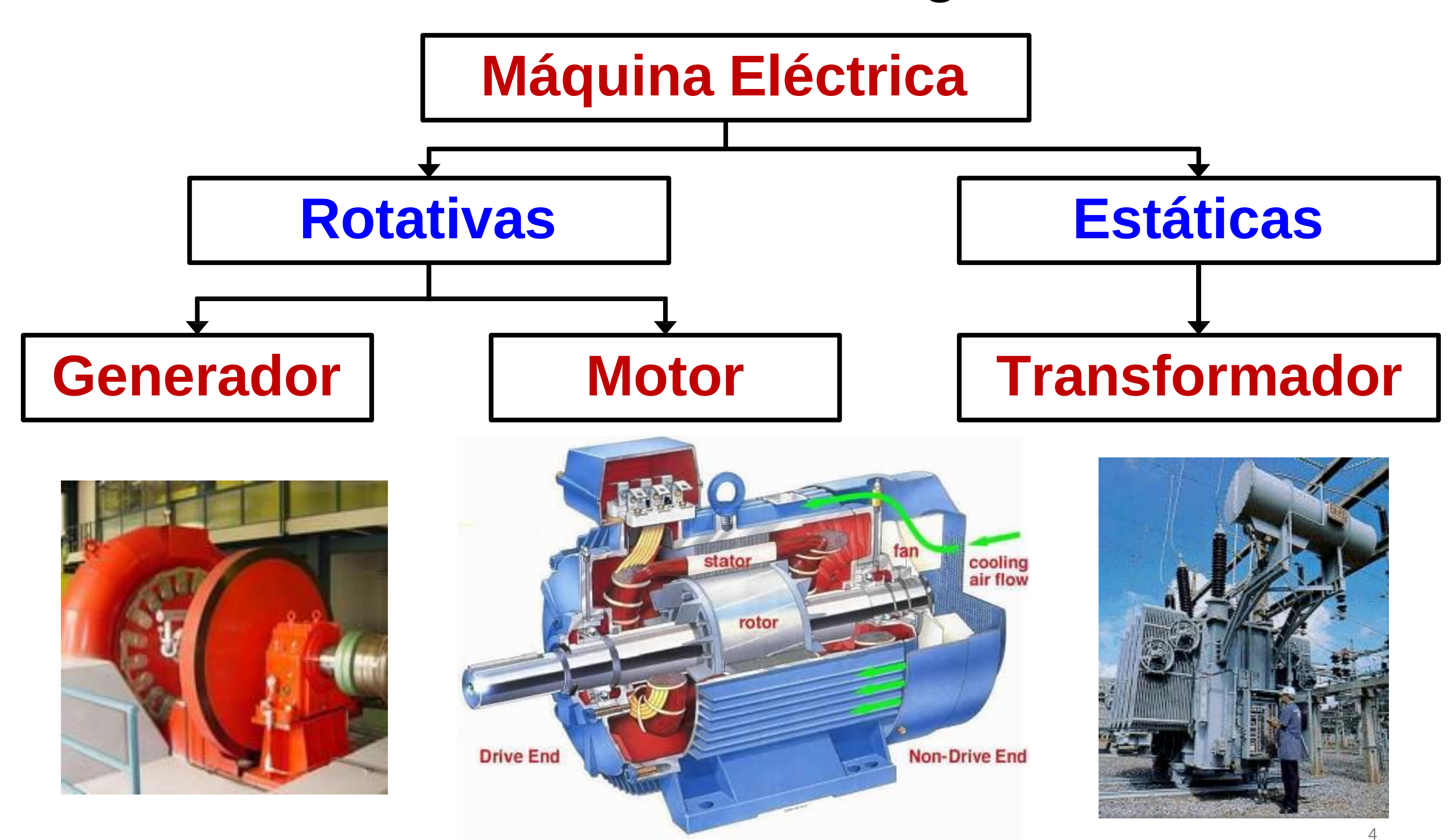




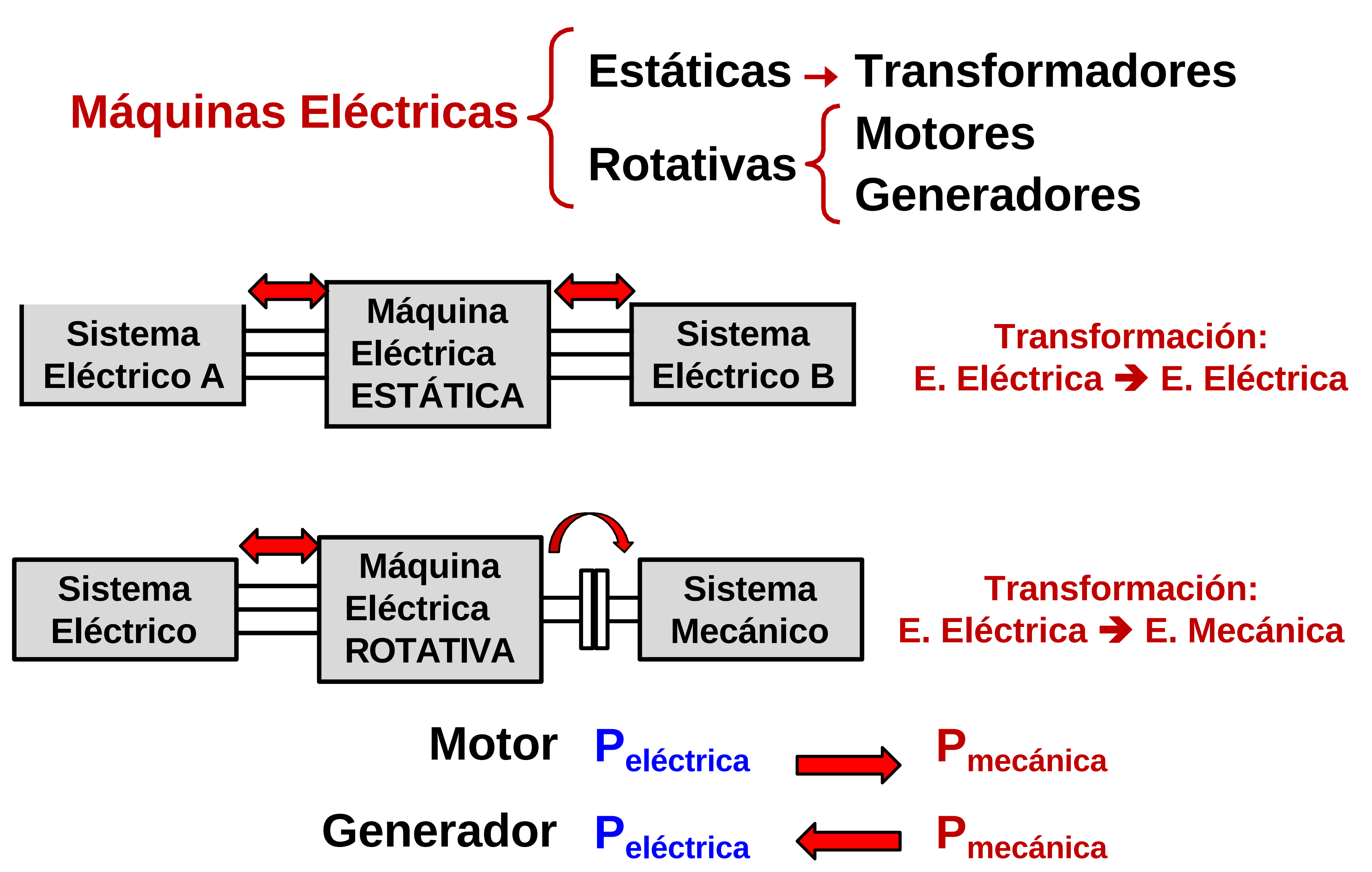


Clasificación de Máquinas Eléctricas

Considerando la existencia de órganos rotantes:

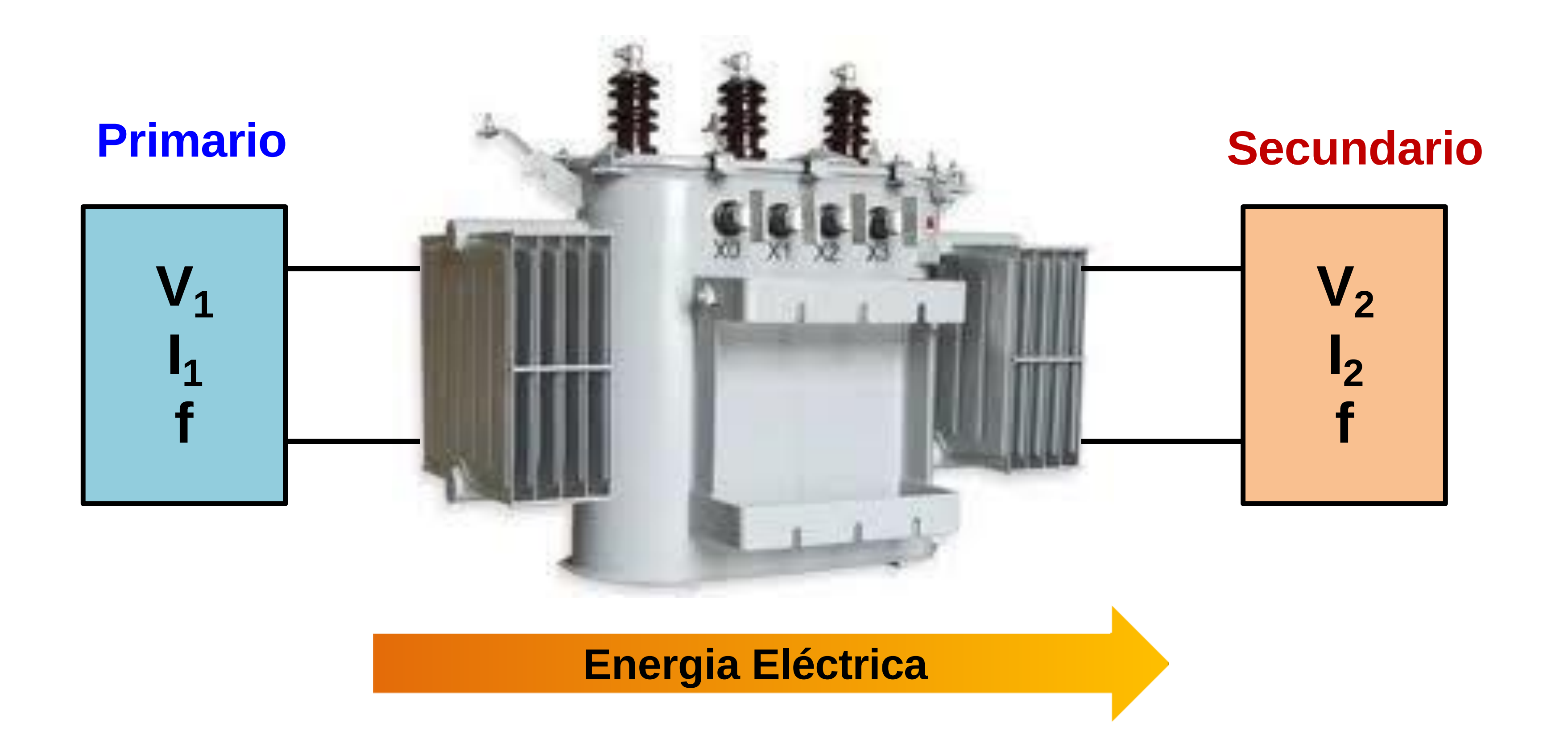


Clasificación de Máquinas Eléctricas

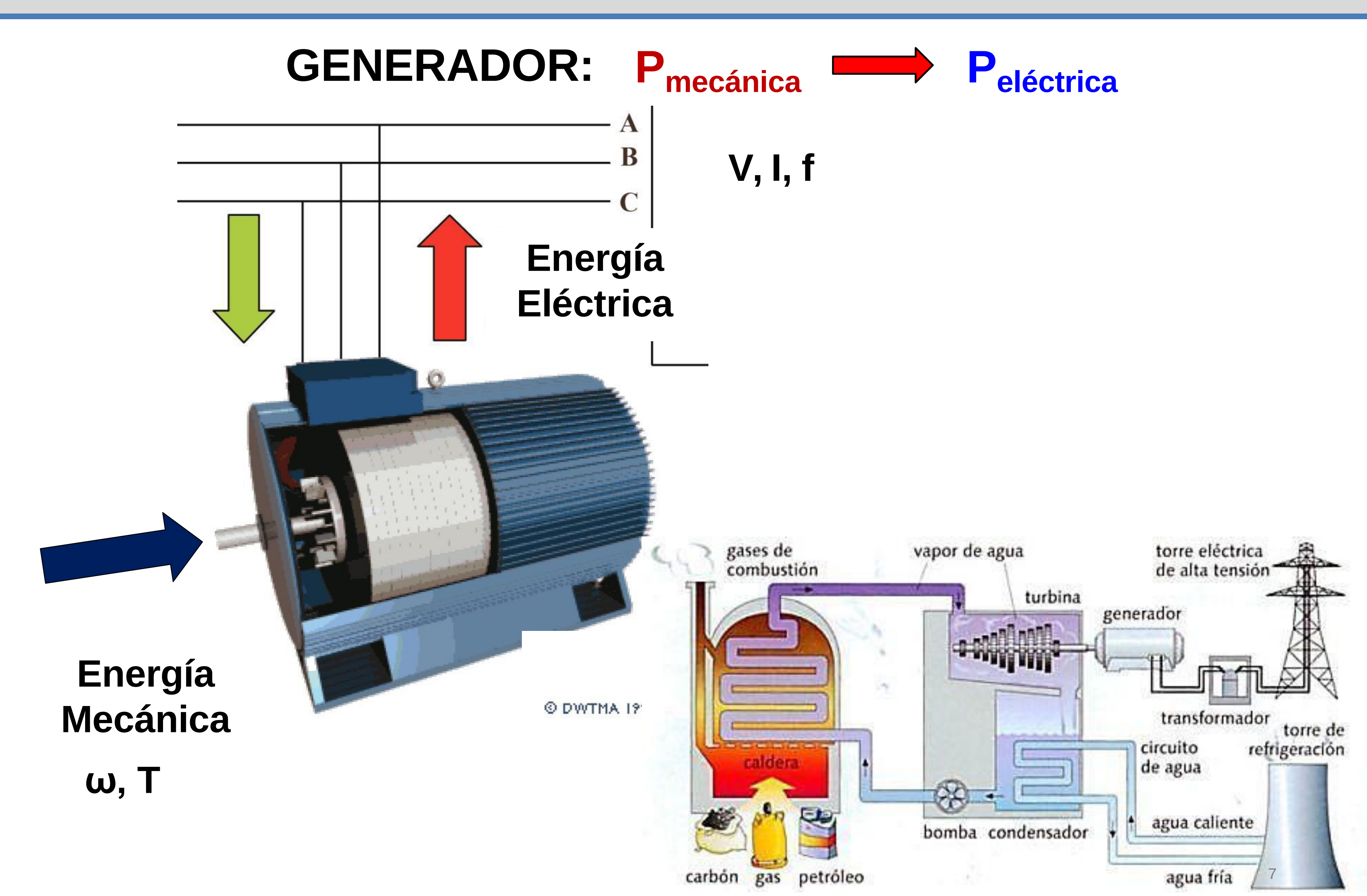


Clasificación de Máquinas Eléctricas

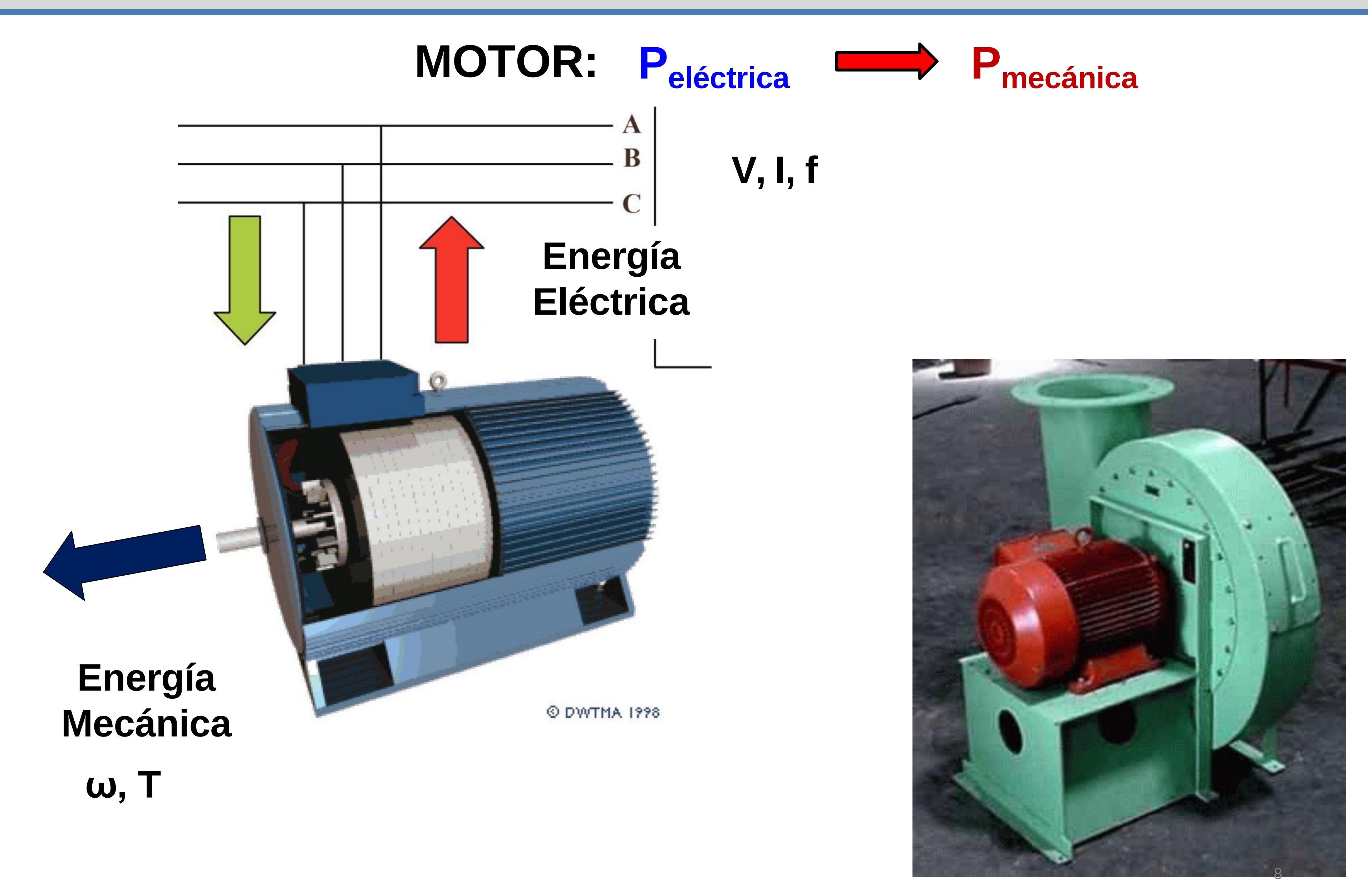
TRANSFORMADOR: $P_{eléctrica}$ ⟷ $P_{eléctrica}$



Clasificación de Máquinas Eléctricas



Clasificación de Máquinas Eléctricas



Fundamentos Electromagnéticos

- El funcionamiento de las ME se basa en la aplicación de los **principios del electromagnetismo**.

- Las ME se caracterizan por tener **circuitos eléctricos y magnéticos entrelazados**.

- Las ME han desempeñado un **papel muy importante en la ingeniería** con aplicación en los campos de generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica.

Fundamentos Electromagnéticos

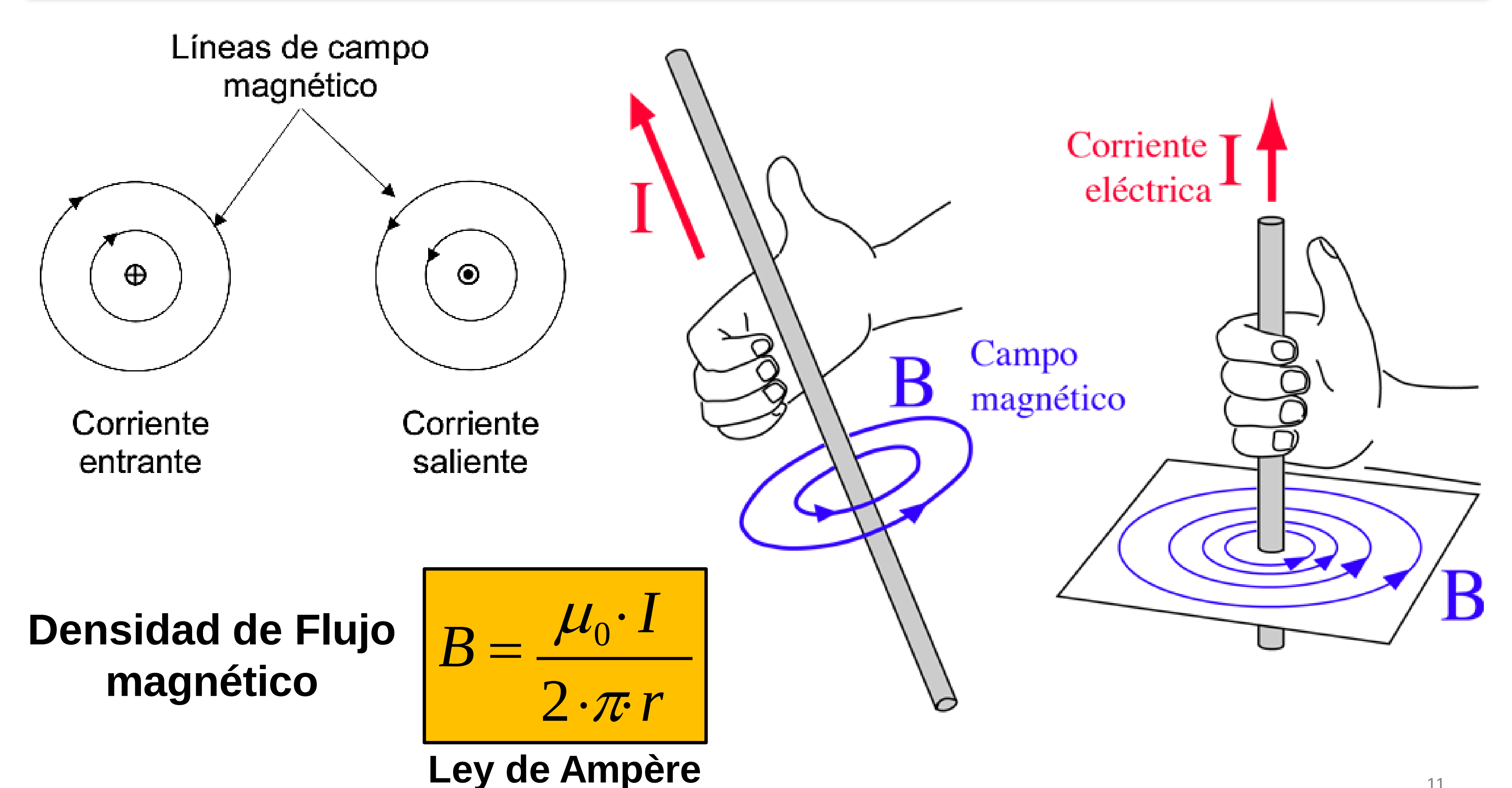
I) Una corriente circulando por un conductor, genera alrededor del mismo un campo magnético.

II) Un flujo magnético variable que atraviesa un conductor genera (induce) una fuerza electromotriz.

III) Un campo magnético genera una fuerza sobre un conductor por el cual circula una corriente eléctrica.

Fundamentos Electromagnéticos

I) Una corriente circulando por un conductor, genera alrededor del mismo un campo magnético.



Densidad de Flujo magnético

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

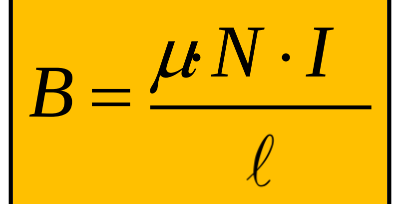
Ley de Ampère

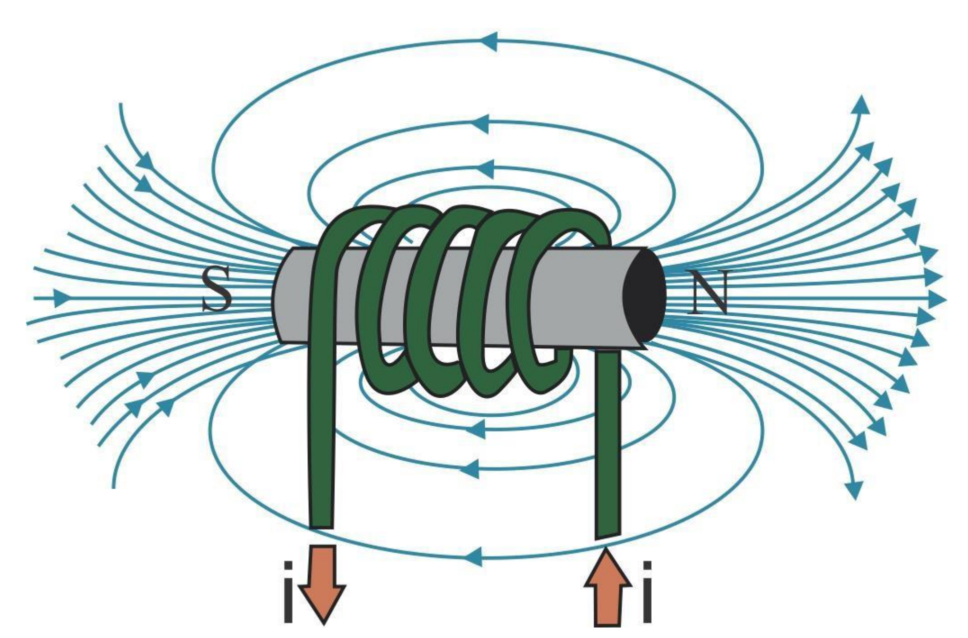
Fundamentos Electromagnéticos

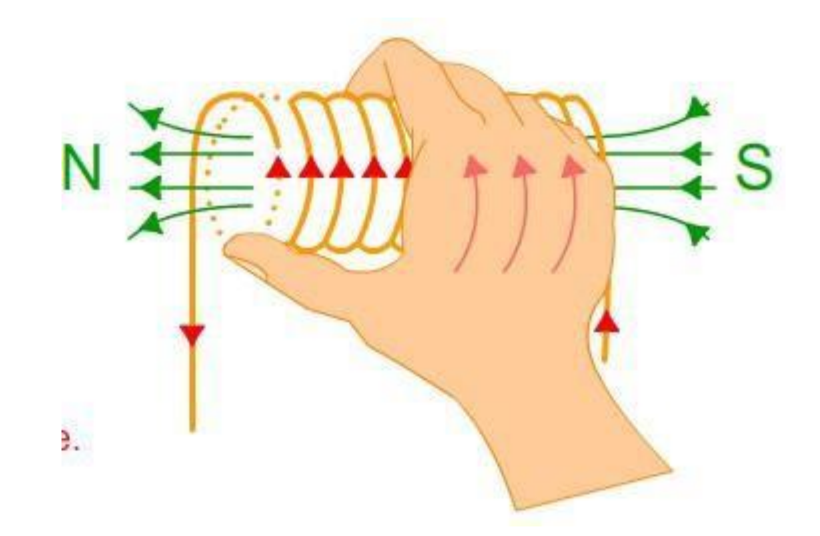
I) Una corriente circulando por un conductor, genera alrededor del mismo un campo magnético.

Para el caso de un **solenoide**…

Densidad de Flujo magnético

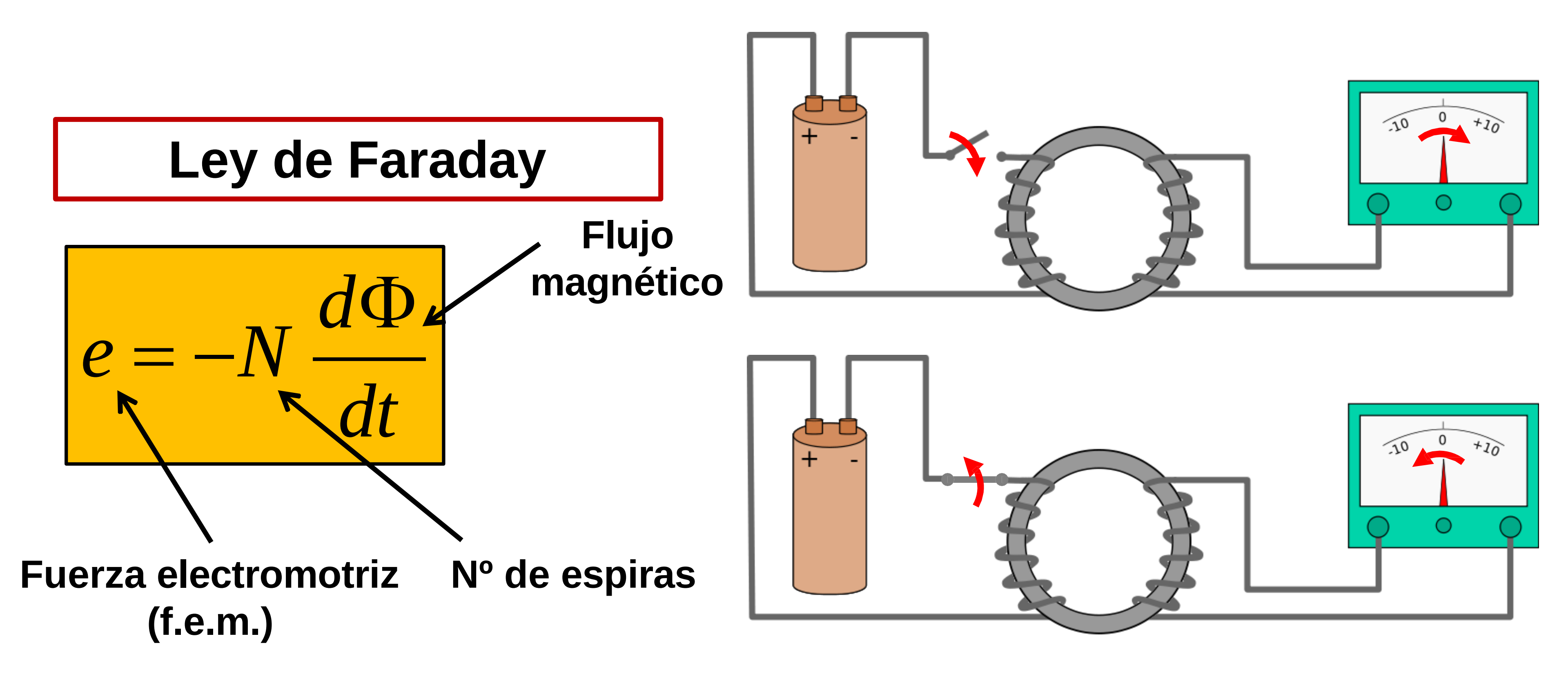






Fundamentos Electromagnéticos

II) Un flujo magnético variable que atraviesa un conductor genera (induce) una fuerza electromotriz.

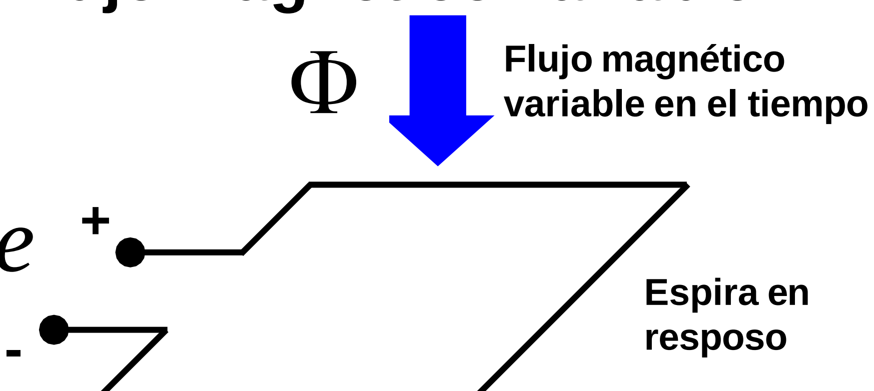


Fundamentos Electromagnéticos

Ley de Faraday

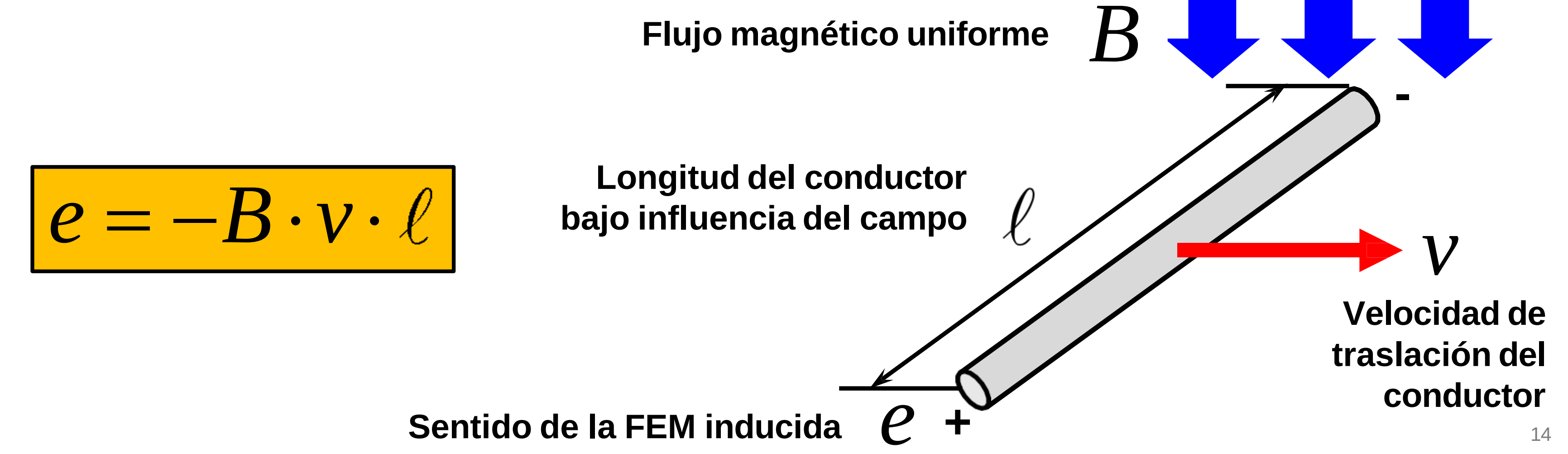
- Conductor en reposo y flujo magnético variable.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$



- Conductor en movimiento y flujo magnético uniforme.

$$e = -B \cdot v \cdot \ell$$

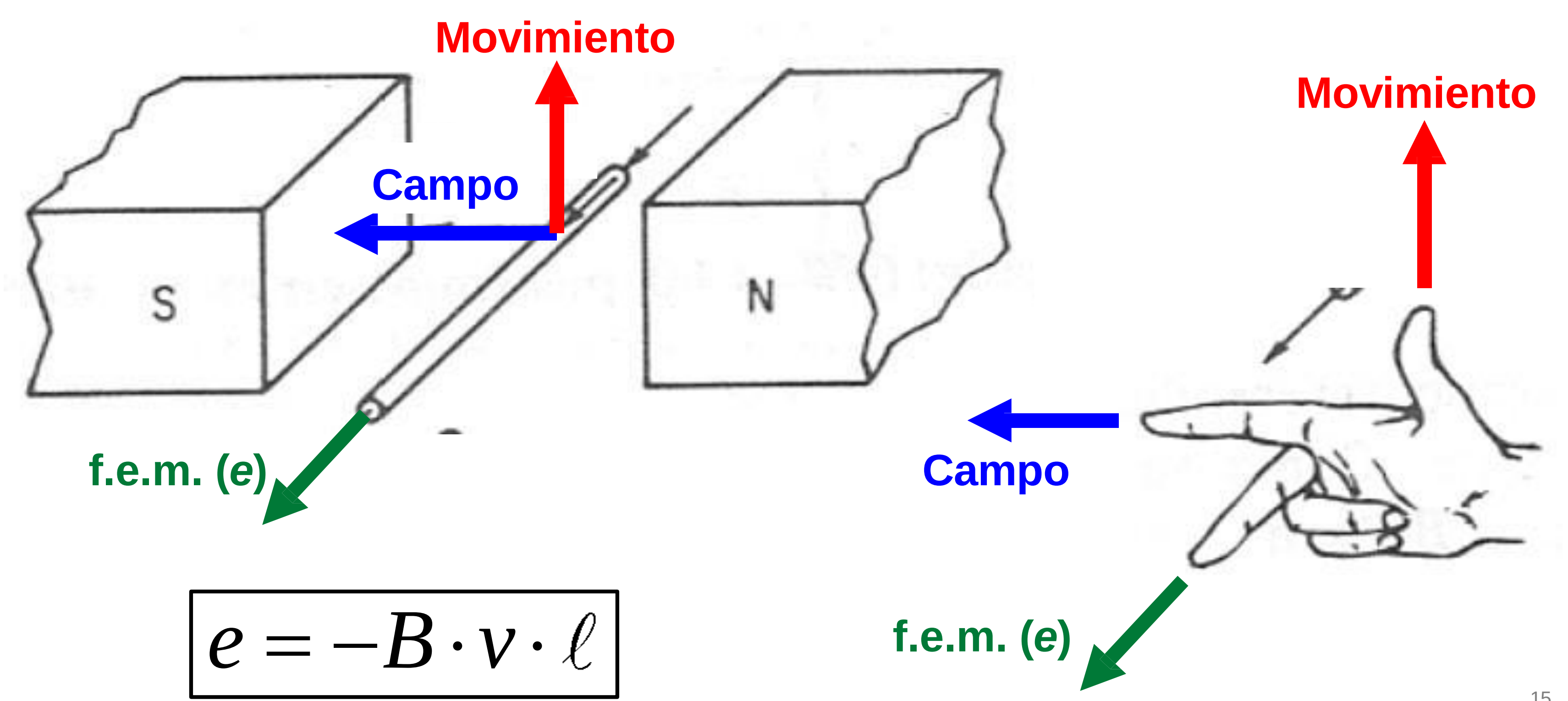


Fundamentos Electromagnéticos

Ley de Faraday

Para determinar el sentido de la f.e.m. inducida

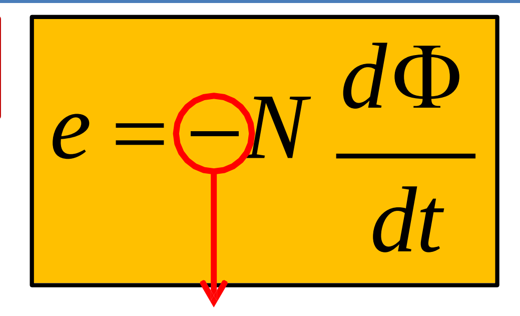
Regla de la mano DERECHA (acción generadora)



$$e = -B \cdot v \cdot \ell$$

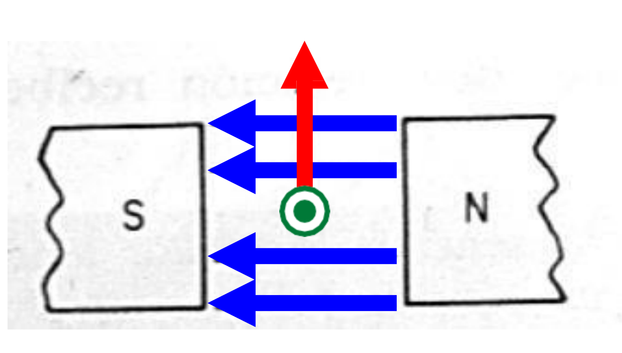
Fundamentos Electromagnéticos

Ley de Faraday

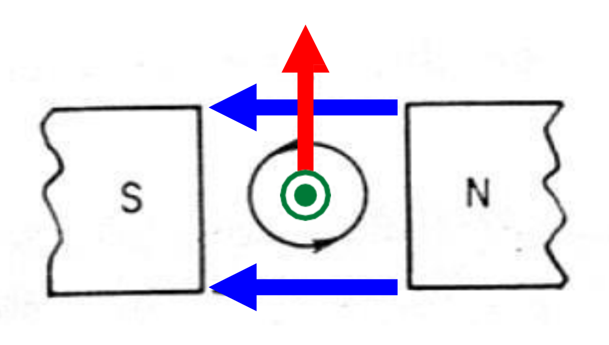


Ley de Lenz

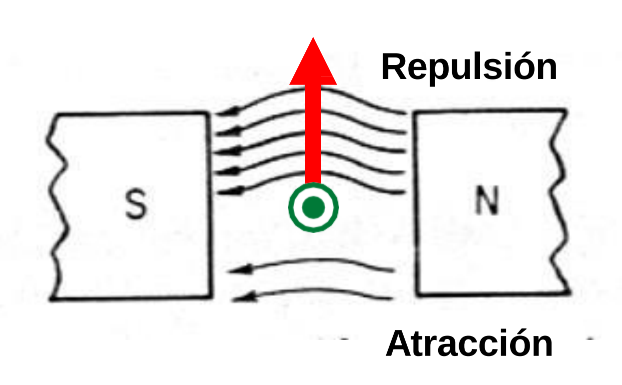
La f.e.m. inducida genera una corriente en un circuito cerrado de tal forma (sentido) que su efecto magnético se oponga a la variación que la ha generado.



(a) Sentido de la fem inducida.



(b) Campo producido por la corriente inducida.



(c) Distorsión resultante del campo magnético.

Fundamentos Electromagnéticos

II) Un flujo magnético variable que atraviesa un conductor genera (induce) una fuerza electromotriz.

$$e = -B \cdot v \cdot \ell$$

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

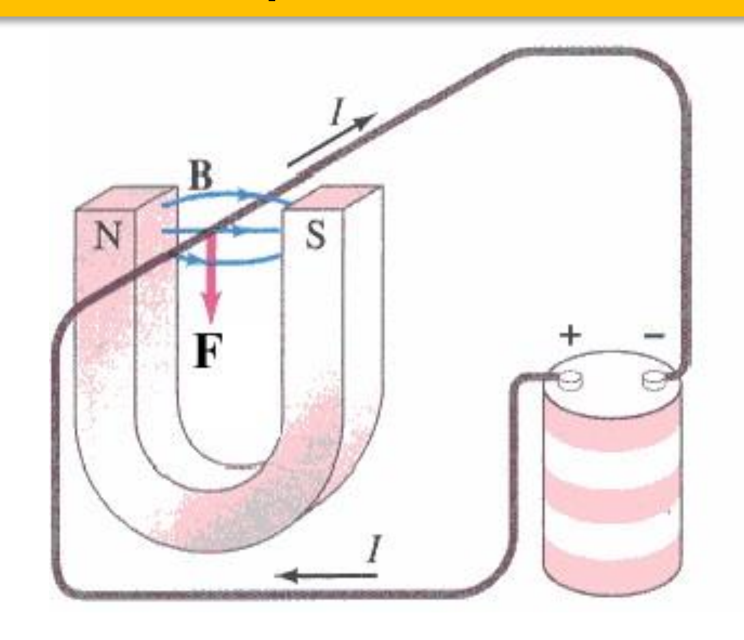
Conductor en movimiento y campo magnético estacionario
Generadores de CC

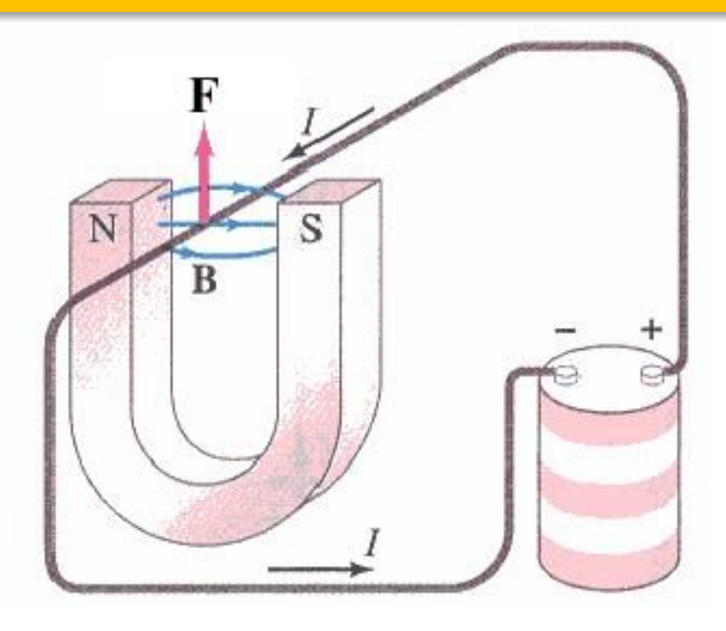
Conductor estacionario y el campo magnético en movimiento
Generadores de CA

Conductor (electroimán) genera campo magnético estacionario y corriente alterna genera un campo magnético variable en el tiempo
Transformador

Fundamentos Electromagnéticos

III) Un campo magnético genera una fuerza sobre un conductor por el cual circula una corriente eléctrica.





Interacción entre el campo magnético generado por cargas eléctricas y el campo magnético externo genera

Fuerza Electromagnética

$$\overrightarrow{dF} = I \cdot d\vec{\ell} \times \vec{B} \quad \Rightarrow \quad \vec{F} = \ell \cdot I \cdot B \cdot sen\theta \quad [N]$$

Fundamentos Electromagnéticos

Fuerza Electromagnética $\vec{F} = \ell \cdot I \cdot B \cdot sen\theta \quad [N]$

- **Intensidad de corriente eléctrica** ► I↑ ➔ F↑
- **Densidad del campo magnético** ► B↑ ➔ F↑
- **Longitud activa del conductor** ► ℓ↑ ➔ F↑
- **Ángulo entre la dirección de circulación de la corriente y el vector densidad de campo magnético**

► **θ = 90º ➔ F = max**

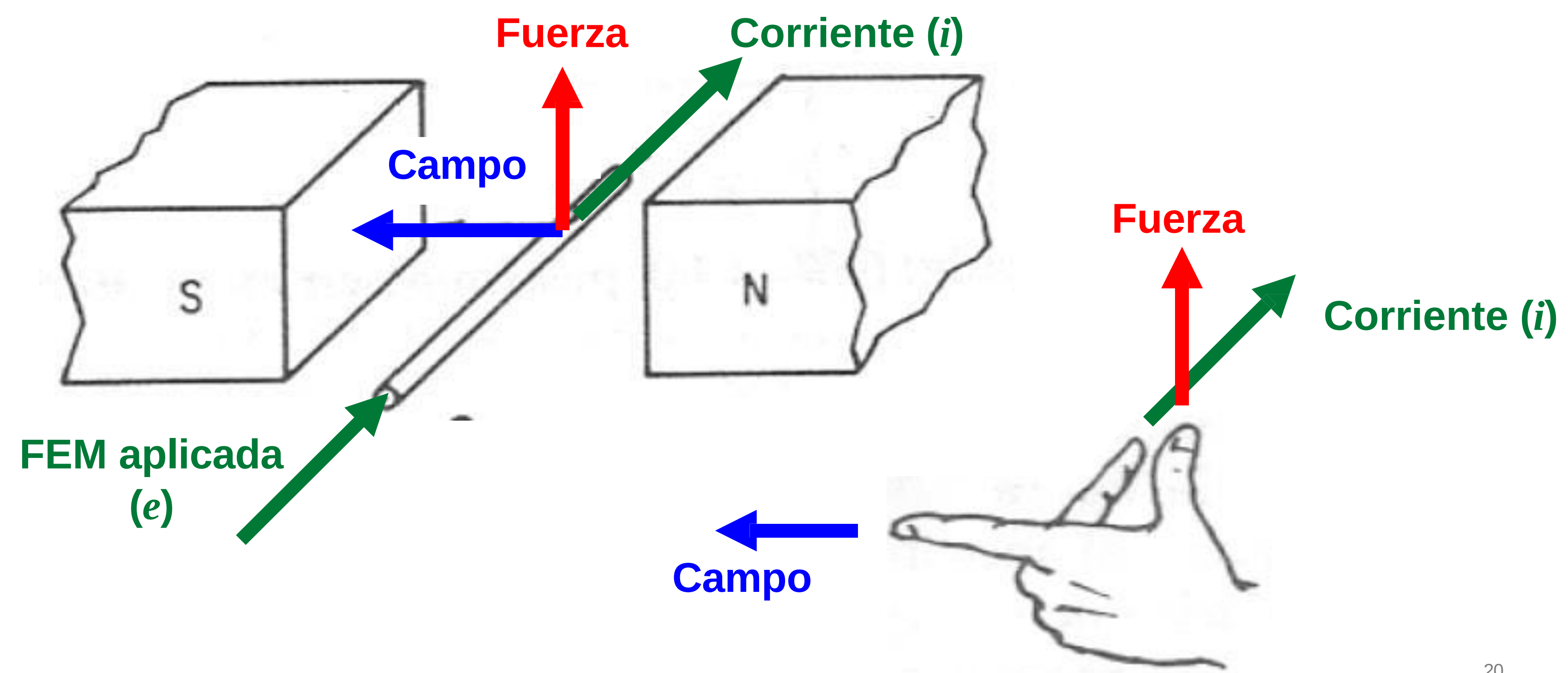
► **θ = 0º ➔ F = 0**

Fundamentos Electromagnéticos

Fuerza Electromagnética $\vec{F} = \ell \cdot I \cdot B \cdot sen\theta \quad [N]$

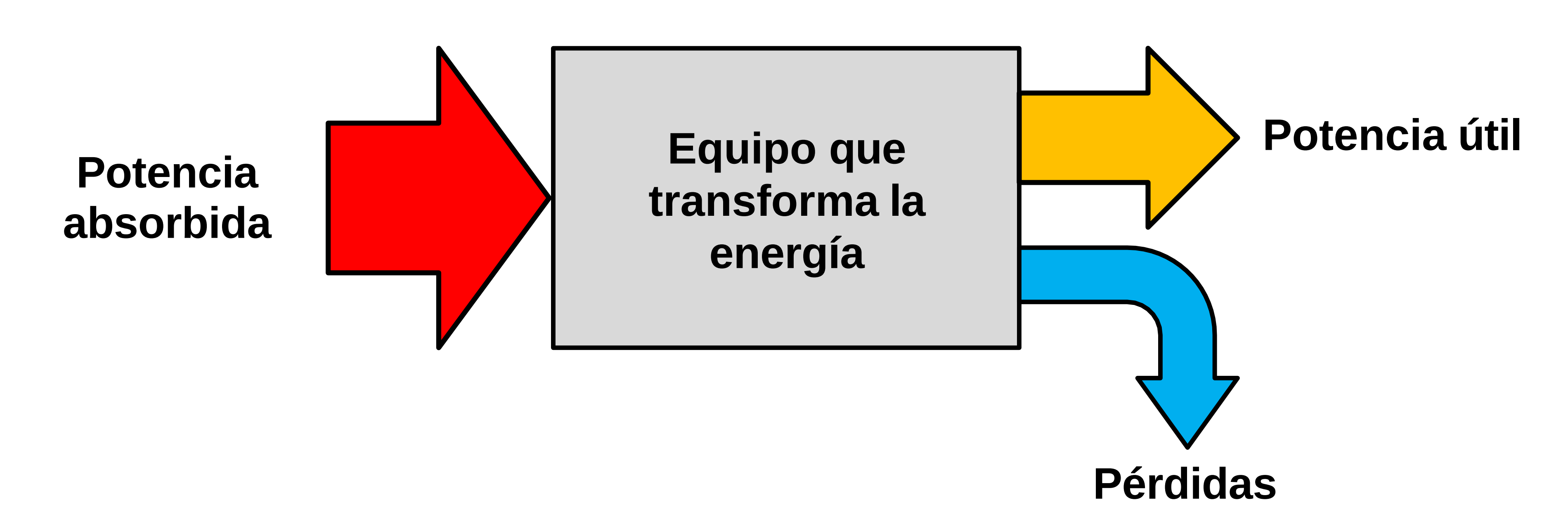
Para determinar el sentido de la fuerza

Regla de la mano IZQUIERDA (acción motora)



Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

En todo proceso de transformación de la energía, se produce una diferencia entre la potencia que entrega el equipo para su utilización (**Potencia útil**), y la potencia que absorbe (**Potencia absorbida**). Esta diferencia se conoce con el nombre de "**pérdidas**".



Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Motor

Energía eléctrica absorbida	=	Energía almacenada en el campo magnético	+	Energía disipada en forma de calor (elect + mec)	+	Energía mecánica en el eje

Generador

Energía mecánica absorbida	=	Energía almacenada en el campo magnético	+	Energía disipada en forma de calor (elect + mec)	+	Energía eléctrica entregada

Transformador

Energía eléctrica absorbida	=	Energía almacenada en el campo magnético	+	Energía disipada en forma de calor (elect)	+	Energía eléctrica entregada

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

El estudio de las **pérdidas** en las ME es importante pues influye en el **rendimiento y calentamiento.**

Las ME están constituidas básicamente por **circuitos eléctricos y circuitos magnéticos**, donde se originan las siguientes pérdidas:

Pérdidas eléctricas → **pérdidas en el Cobre**

Pérdidas magnéticas → **pérdidas en el Hierro**

Pérdidas mecánicas → **partes en movimiento**

Pérdidas adicionales → **diferente clasificación**

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas eléctricas → **pérdidas en el Cobre**

Las ME cuentan con **circuitos eléctricos**, los cuales presentan una inevitable **resistencia eléctrica**:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Circulación de corriente → **Pérdidas por efecto Joule**

$$P_{Cu} = \sum i_j^2 R_j$$

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas eléctricas → **pérdidas en el Cobre**

Reemplazando la resistencia por su equivalente, nos queda:

$$P_{Cu} = \sum i_j^2 \left(\rho_j \frac{l_j}{S_j} \right) = \sum i_j^2 \left(\rho_j \frac{l_j}{S_j} \right) \frac{S_j}{S_j}$$

considerando la densidad de corriente: $J = i/S$

y el volumen del material: $vol = S_j l_j$

$$P_{Cu} = \sum \rho_i J_i^2 (vol)_i$$

[W]

Resistividad [Ωmm²/m]

Densidad de corriente [A/mm²]

Volumen de material activo [m³]

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas magnéticas → **pérdidas en el Hierro**

Cuando se somete un material magnético a la acción de un campo magnético variable, se originan dos tipos de pérdidas:

- **Por histéresis →** imantación alternativa
- **Por corrientes parásitas →** corrientes de Foucault

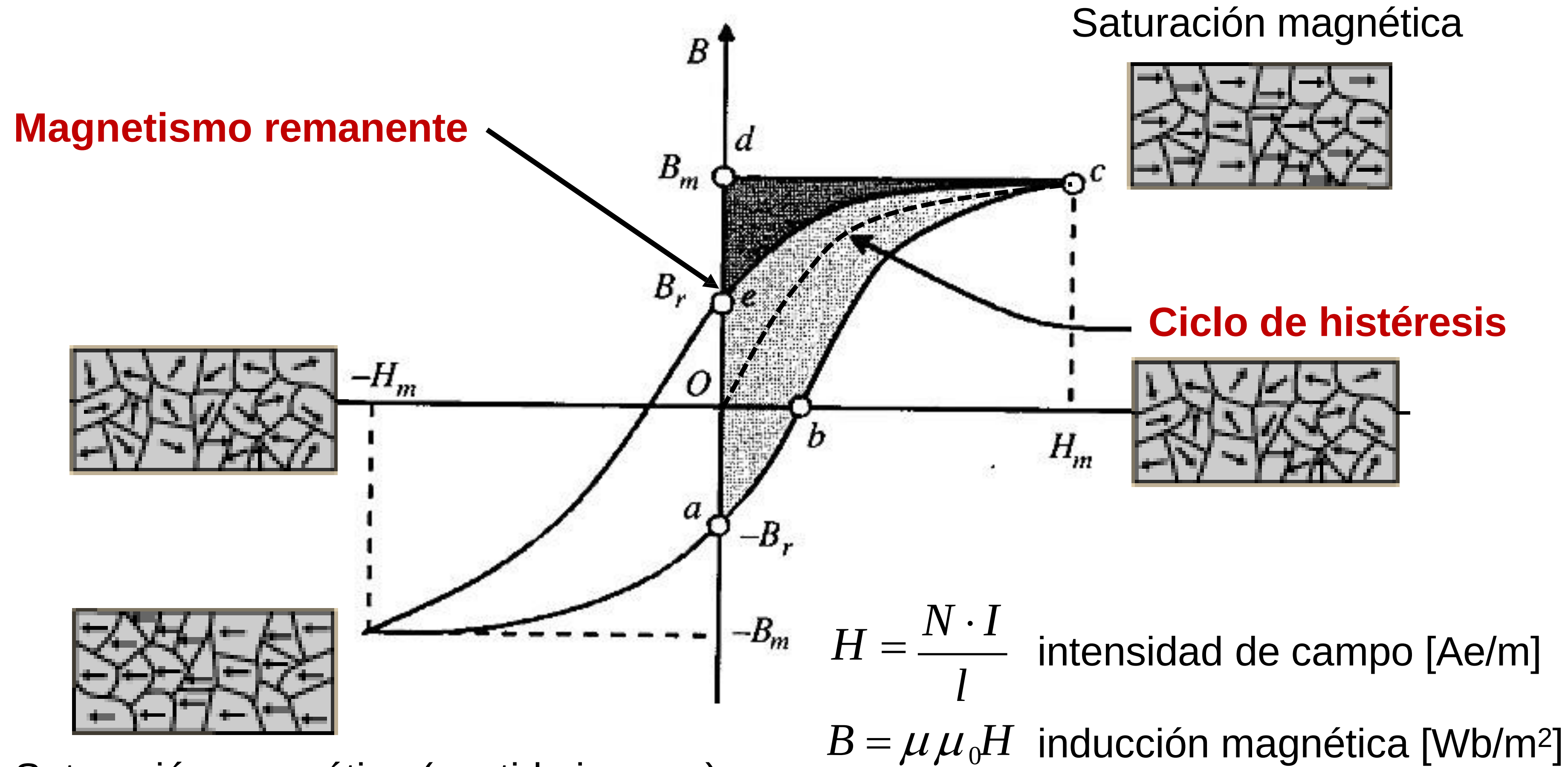
Conversión de energía en forma de **calor**

$$P_{Fe} = P_H + P_F$$

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas magnéticas ➔ **pérdidas en el Hierro**

- **Por histéresis ➔** imantación alternativa



$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$ intensidad de campo [Ae/m]

$$B = \mu \mu_0 H$$ inducción magnética [Wb/m²]



Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas magnéticas → **pérdidas en el Hierro**

- **Por histéresis →** $P_H = vol \cdot f \cdot K_h \cdot B_{max}^n$ $[W]$

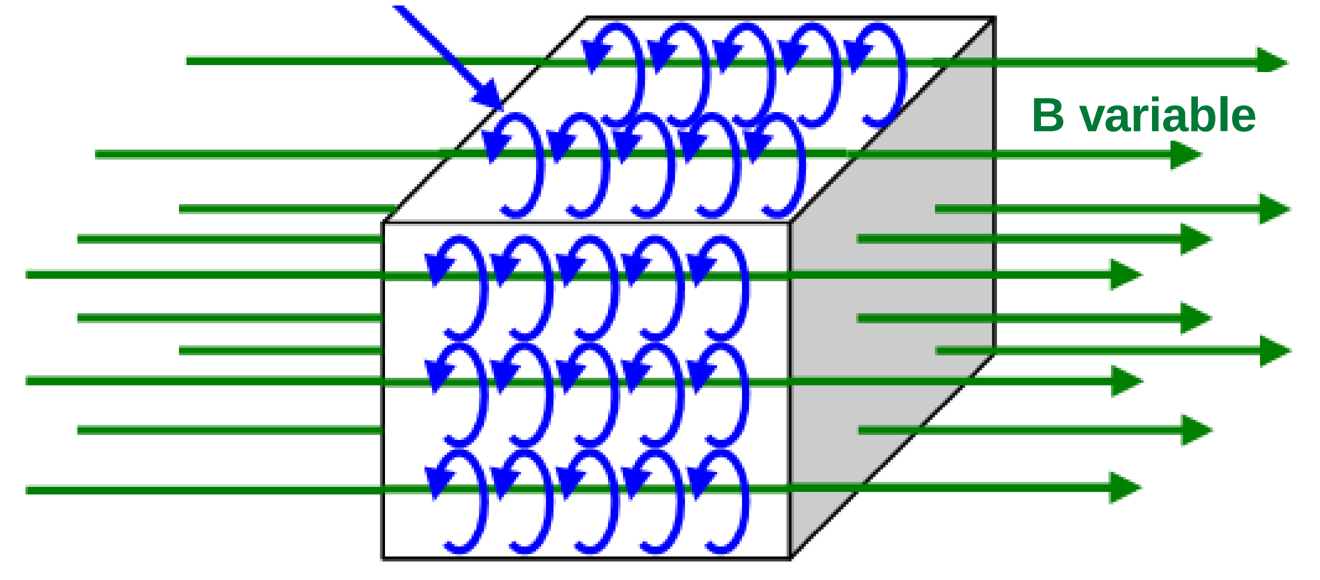
vol	volumen del núcleo [m³]
f	frecuencia de flujo magnético [Hz]
K_h	coeficiente de Steinmetz, depende del material del núcleo, del tratamiento térmico y mecánico de la chapa
B_{max}	amplitud del campo magnético sinusoidal [Wb/m²]
n	coeficiente que depende de B_{max} (tipo de material)

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas magnéticas → **pérdidas en el Hierro**

- **Por Corrientes parásitas** → corrientes de Foucault

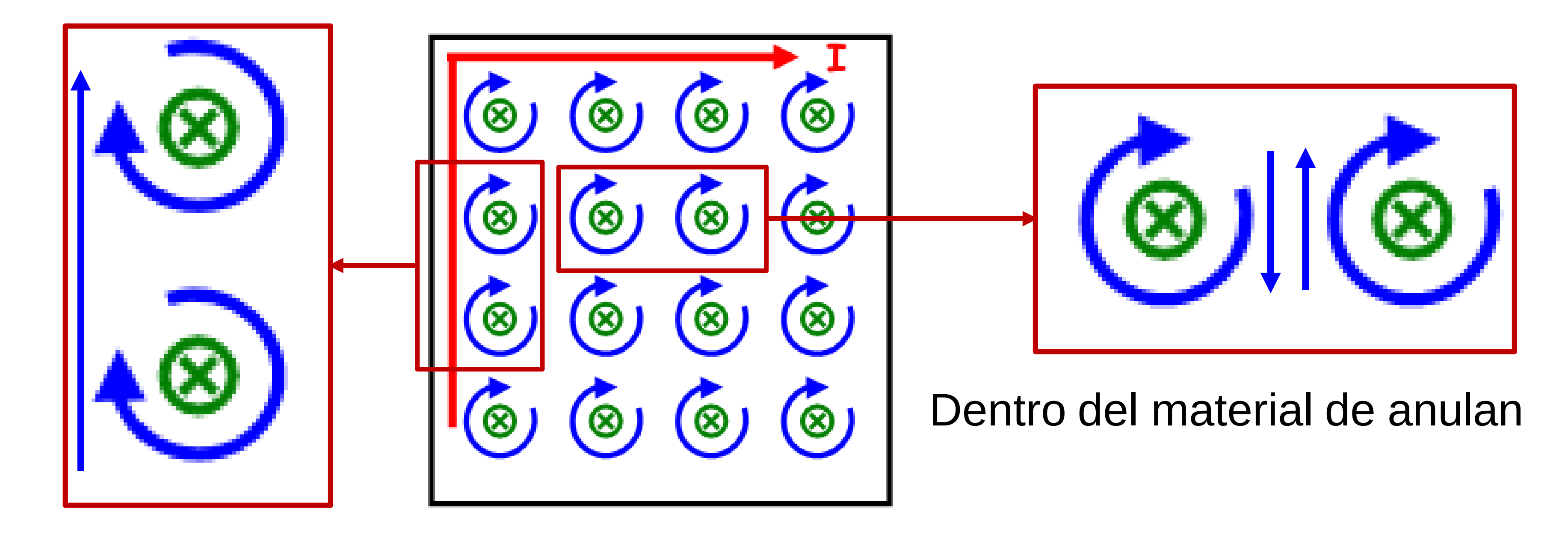
El **campo magnético variable induce f.e.m.s** también en el núcleo de hierro → **circulación de corrientes** en su interior.



Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas magnéticas ➔ **pérdidas en el Hierro**

- **Por Corrientes parásitas ➔** corrientes de Foucault



En la periferia del material de suman

Pérdida adicionales de energía por efecto Joule (i^2R)

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas magnéticas → **pérdidas en el Hierro**

- **Por Corrientes parásitas →** corrientes de Foucault

$$P_F = vol \cdot K_e \cdot \left(f \cdot B_{\max} \cdot \tau \right)^2 \quad [W]$$

vol	volúmen activo del núcleo [m³]
K_e	coeficiente que depende de la conductividad del material
f	frecuencia del flujo magnético [Hz]
B_{max}	amplitud del campo magnético sinusoidal [Wb/m²]
τ	Espesor de la chapa [m]

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

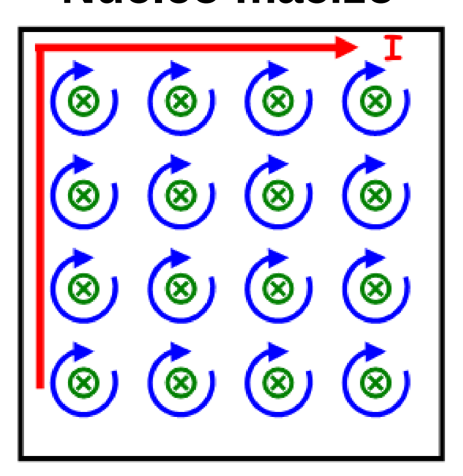
Pérdidas magnéticas ➔ **pérdidas en el Hierro**

- **Por Corrientes parásitas ➔** corrientes de Foucault

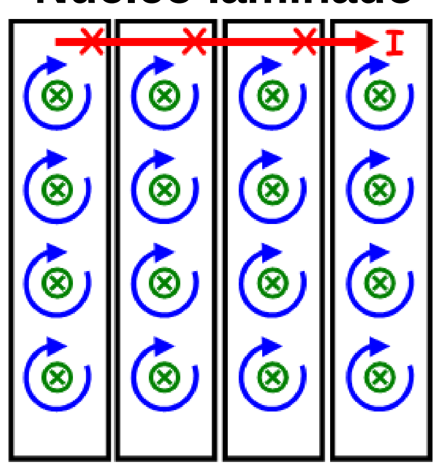
Para un material dado y a una frecuencia e inducción establecidas ➔ **P_F dependen del cuadrado del espesor**.

$$P_F = vol \cdot K_e \cdot (f \cdot B_{max} \cdot \tau)^2$$

Núcleo macizo



Núcleo laminado



Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas magnéticas: **consecuencias prácticas**

- Utilizar material ferromagnético de **mayor permeabilidad posible** y con **elevada saturación → facilita la circulación de flujo magnético**.
- Materiales **magnéticos blandos →** ciclo de histéresis estrecho y alta saturación **→ reduce las pérdidas P_H**.
- Materiales magnéticos con **baja conductividad eléctrica → reduce las pérdidas P_F**.
- **Circuito magnético laminado → reduce las pérdidas P_F**.

Actualmente:

- **Chapas de acero al silicio** (3% a 5%) de 0,3 a 0,5 mm de espesor **→ ↑resistencia, ↑permeabilidad magnética, ↑aumenta fragilidad**.
- Tratamiento químico de **fosfatación superficial** “Carlite” **→ aislamiento de menores espesores**.

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas mecánicas → **partes en movimiento**

Ocurren solamente en ME rotativas, se deben:

1. **Rozamientos en los cojinetes del rotor.**
2. **Rozamientos de las escobillas en el colector.**
3. **Rozamiento de las partes móviles con el aire.**
4. **Potencia absorbida por autoventilación.**

$P_{mec\ 1,2}$ = función de ***n (velocidad)***
$P_{mec3,4}$ = función de n^3

$$P_{mec} = A \cdot n + B \cdot n^3$$

Como en general la velocidad (***n***) en las ME es constante, las pérdidas mecánicas para un estado de régimen, son prácticamente **constantes**.

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Pérdidas adicionales → **diferente clasificación**

- Origen diverso debido a **efectos secundarios**
  - **En el hierro →** incremento de pérdidas con la máquina en carga, respecto de vacío.
  - **En el cobre →** desigual distribución de corriente en la sección del conductor.

- Difíciles de cuantificar.

- Se considera un **valor fijo del orden de 0,5% a 1,0%** de la potencia útil.

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

Otra **clasificación** de las pérdidas se pueden hacer en función de **cómo varían**:

- **Pérdidas FIJAS**: no varían con la potencia
- **Pérdidas VARIABLES**: varían con la potencia

$$P_{mec} = f(n)$$ ➔ como ***n* ≈ *cte.***

$$P_{Fe} = f(B, f)$$ ➔como ***B y f ≈ cte.***

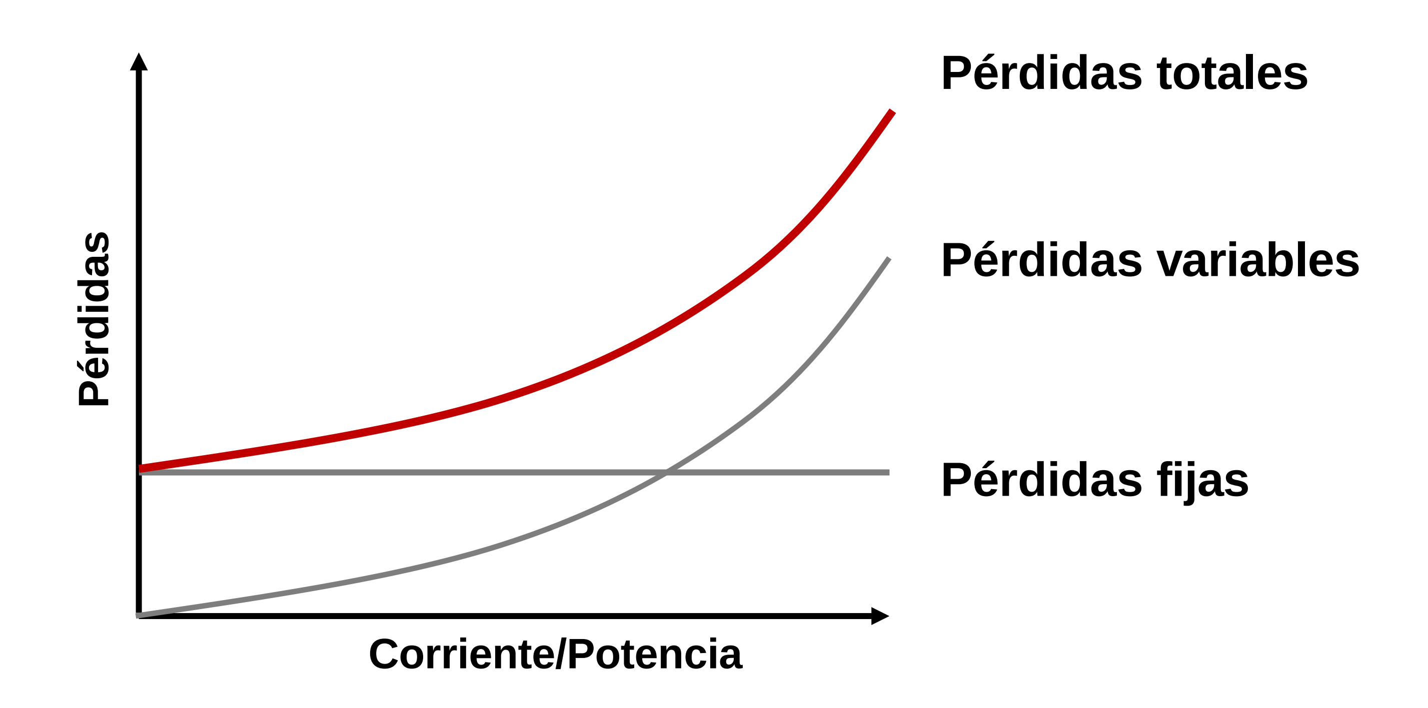
} **FIJAS**

$$P_{Cu} = f(i)$$ ➔ Variación de potencia ➔ **i ≠ cte.** } **VARIABLES**

Pérdidas en las Máquinas Eléctricas

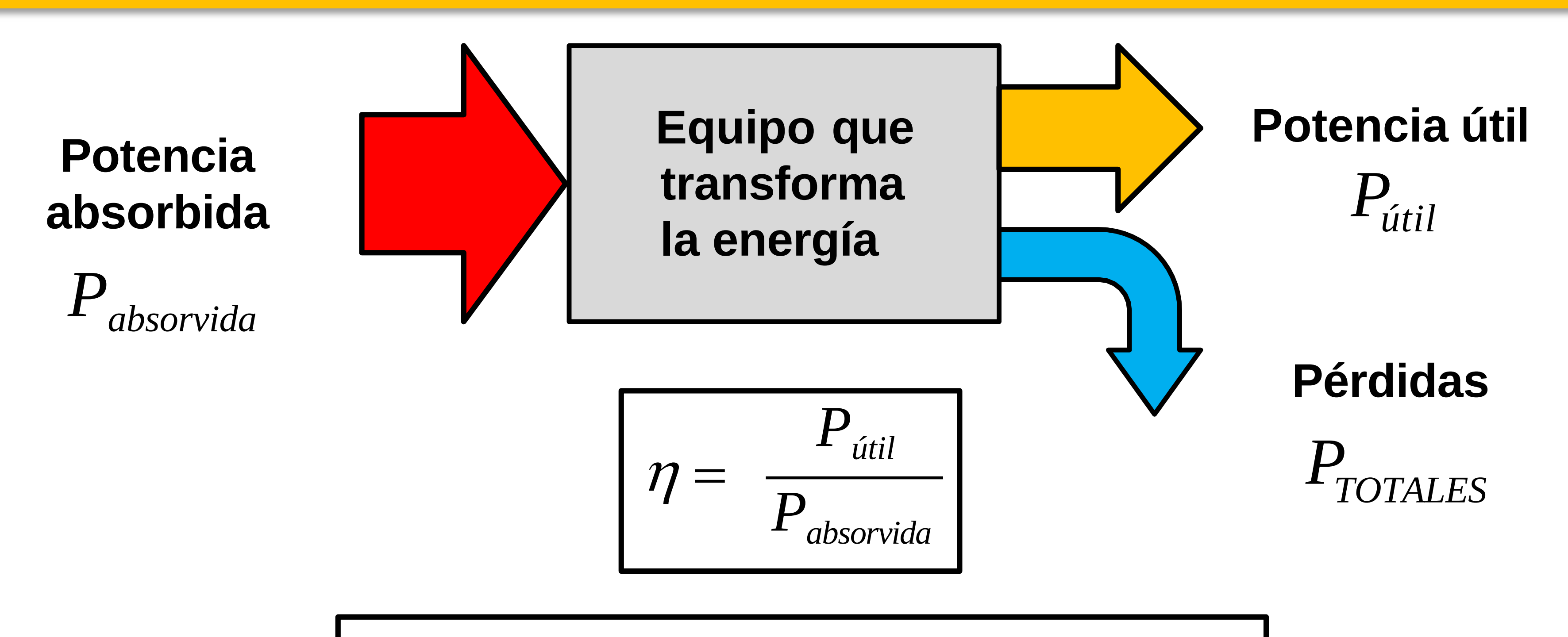
Otra **clasificación** de las pérdidas se pueden hacer en función de **cómo varían**:

$$P_{TOTALES} = P_{FIJAS} + P_{VARIABLES} = \left(P_{Fe} + P_{mec}\right) + P_{Cu}$$



Rendimiento de las Máquinas Eléctricas

Se define como **rendimiento** de un equipo a la **relación** entre la potencia que entrega (**potencia útil**) y la potencia que absorbe (**potencia absorbida**)



$$\eta = \frac{P_{útil}}{P_{absorvida}}$$

$$\eta = \frac{P_{útil}}{P_{útil} + P_{TOTALES}} = \frac{P_{absorvida} - P_{TOTALES}}{P_{absorvida}}$$

Rendimiento de las Máquinas Eléctricas

$$\eta = \frac{P_{útil}}{P_{útil} + P_{TOTALES}}$$

$$P_{TOTALES} = P_{FIJAS} + P_{VARIABLES} = \left(P_{Fe} + P_{mec}\right) + P_{Cu}$$

Las **pérdidas variables** son proporcionales al cuadrado de la corriente (**I²**), como consecuencia a la potencia (**P = UI**), luego:

$$P_{VARIABLES} = P_{Cu} = k\,i^2 = b\,P^2$$

Quedando:

$$\eta = \frac{P}{P + P_{FIJAS} + b\,P^2} \rightarrow \eta = f\left(P\right)$$

Rendimiento de las Máquinas Eléctricas

Para determinar la condición para la cual la función se hace máxima:

$$\frac{d\eta}{dP} = 0 \rightarrow \frac{P + P_{FIJAS} + bP^2 - P\left(1 + 2bP\right)}{\left(P + P_{FIJAS} + bP^2\right)^2} = 0$$

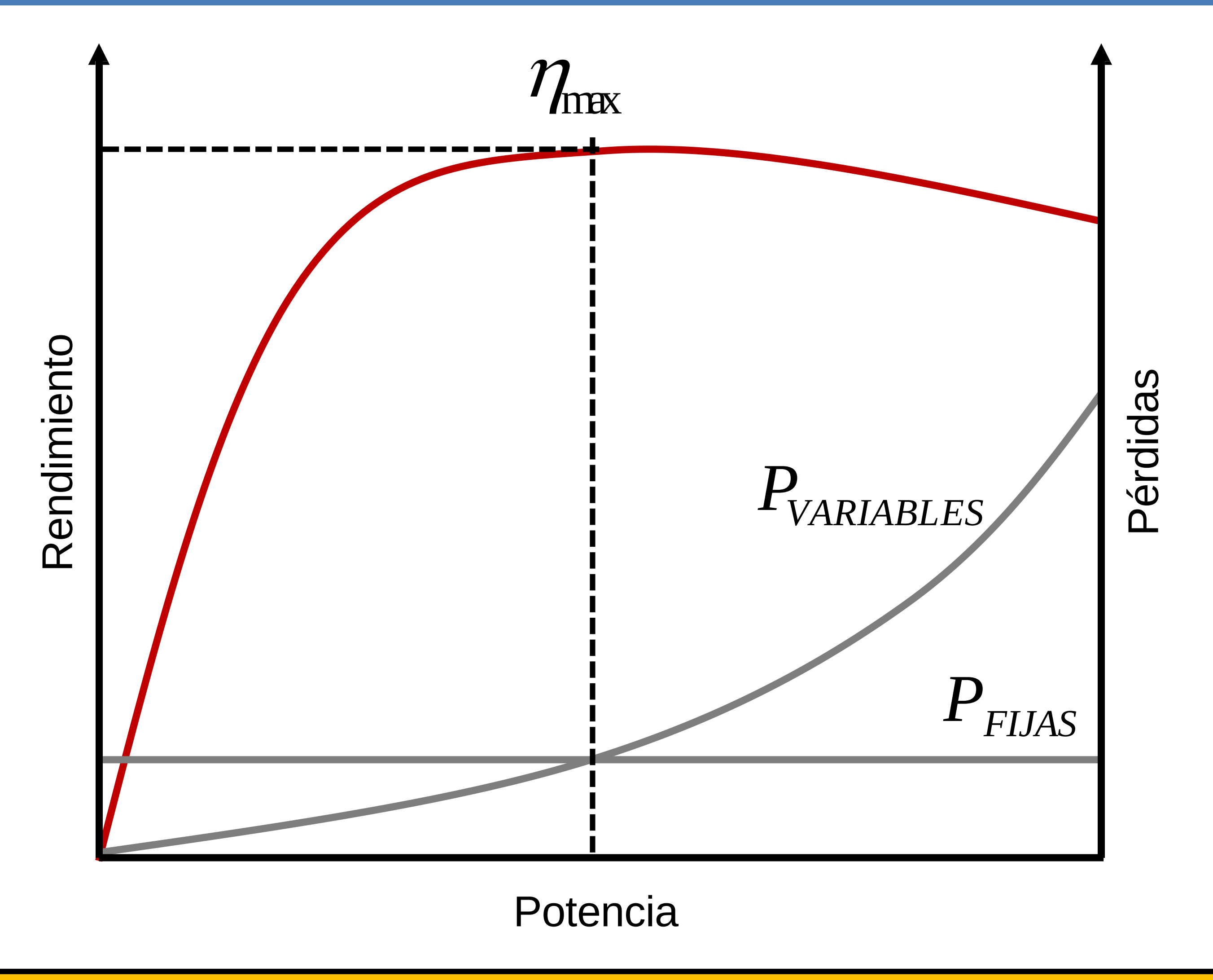
de donde:

$$P + P_{FIJAS} + bP^2 - P\left(1 + 2bP\right) = 0$$

$$P_{FIJAS} = bP^2 = P_{VARIABLES}$$

Una ME funcionando con **U=cte., n=cte., fdp=cte. y f=cte. ➔ rendimiento máximo** cuando las pérdidas fijas igualan a las variables, es decir, $\mathbf{P_{Fe} + P_{mec} = P_{Cu}}$.

Rendimiento de las Máquinas Eléctricas



$$\eta_{max} = f\left(P\right) \Rightarrow P_{FIJAS}\left(P_{Fe} + P_{mec}\right) = P_{VARIABLES}\left(P_{Cu}\right)$$

Parámetros Nominales

- Para proyectar una ME es necesario conocer, o establecer, una serie de **condiciones relacionadas con el fin o servicio al que se destinará la ME**.
- Para esto debe definirse el:

RÉGIMEN NOMINAL

Conjunto de condiciones de funcionamiento para las cuales ha sido construida la máquina; comprende tensión, potencia, clase de servicio, frecuencia, intensidad de corriente, factor de potencia, velocidad, etc., **nominales**.

Parámetros Nominales

De todas las condiciones nominales, las más importante es:

POTENCIA NOMINAL

Es la potencia que la máquina puede desarrollar, cuando la tensión, corriente, velocidad, clase de servicio, etc., son las nominales, o sea aquella para las cuales fue construida, sin que la **sobre elevación de temperatura** en sus diversos órganos, alcance o sobrepase, sus correspondientes **temperaturas límites**.

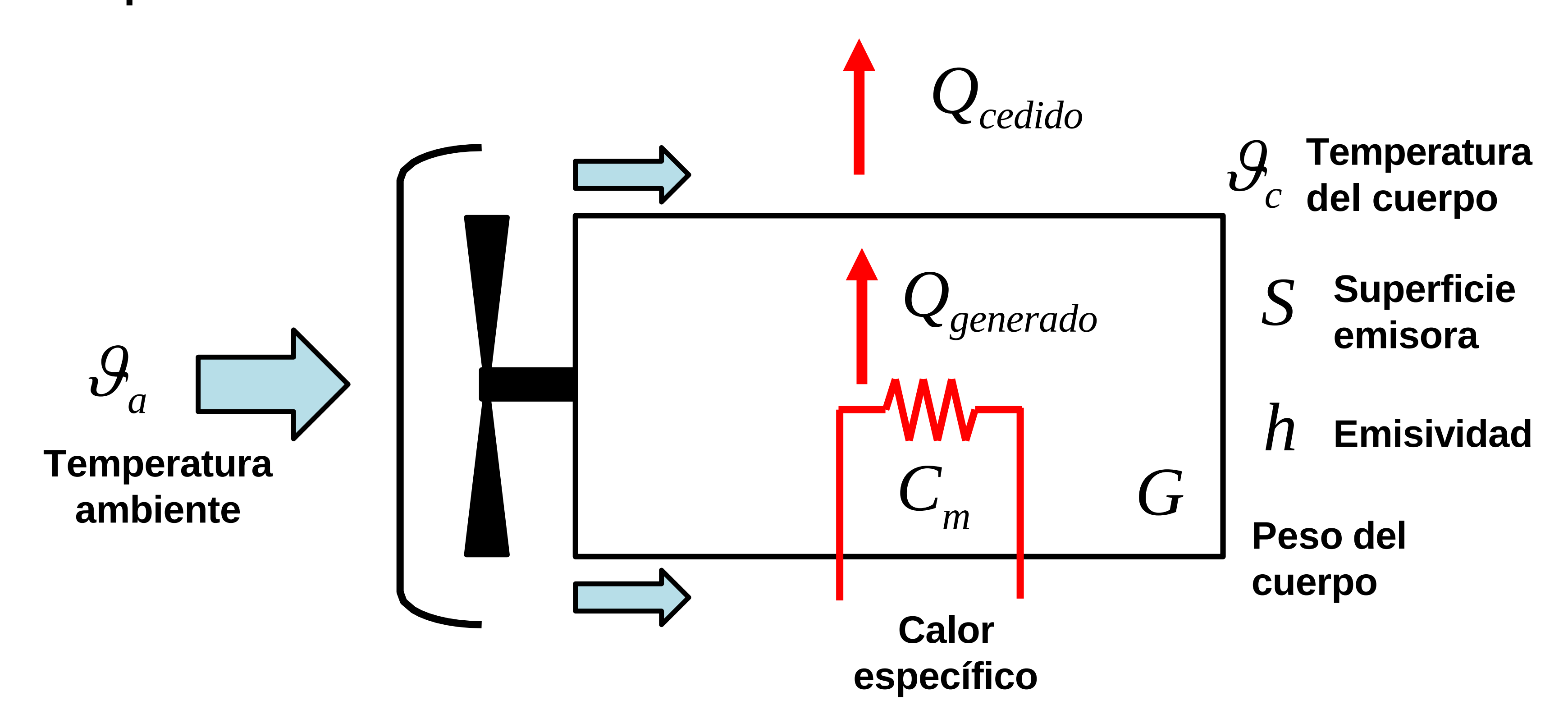
Parámetros Nominales

Unidades de potencia según tipo de ME:

Generadores de CC	Potencia eléctrica nominal en bornes.	**kW**
Generadores de CA	Potencia aparente nominal en bornes (junto con f.d.p.)	**kVA**
Motores	Potencia mecánica nominal, disponible en el eje.	**CV, HP (kW)**
Convertidores	Potencia eléctrica nominal en bornes secundarios.	**kVA o kW**

Calentamiento y Enfriamiento

Las pérdidas de energía de cualquier máquina se convierten en calor, originándole una elevación de la temperatura:



Calentamiento y Enfriamiento

- Para el estudio se considera a la ME como un **cuerpo homogéneo**.
- La temperatura aumentará cuando **$Q_{generado}$ > Q_{cedido}**
- El proceso continúa hasta que la ME toma una temperatura tal que **$Q_{generado}$ = Q_{cedido} ➔ temperatura de servicio**

La ecuación diferencial de equilibrio es:

$$dQ = q \cdot dt = G \cdot C_m \cdot d\theta + S \cdot h \cdot \theta \cdot dt$$

$d\theta = \vartheta_c - \vartheta_a$ sobreelevación de temperatura con respecto a la temperatura ambiente.

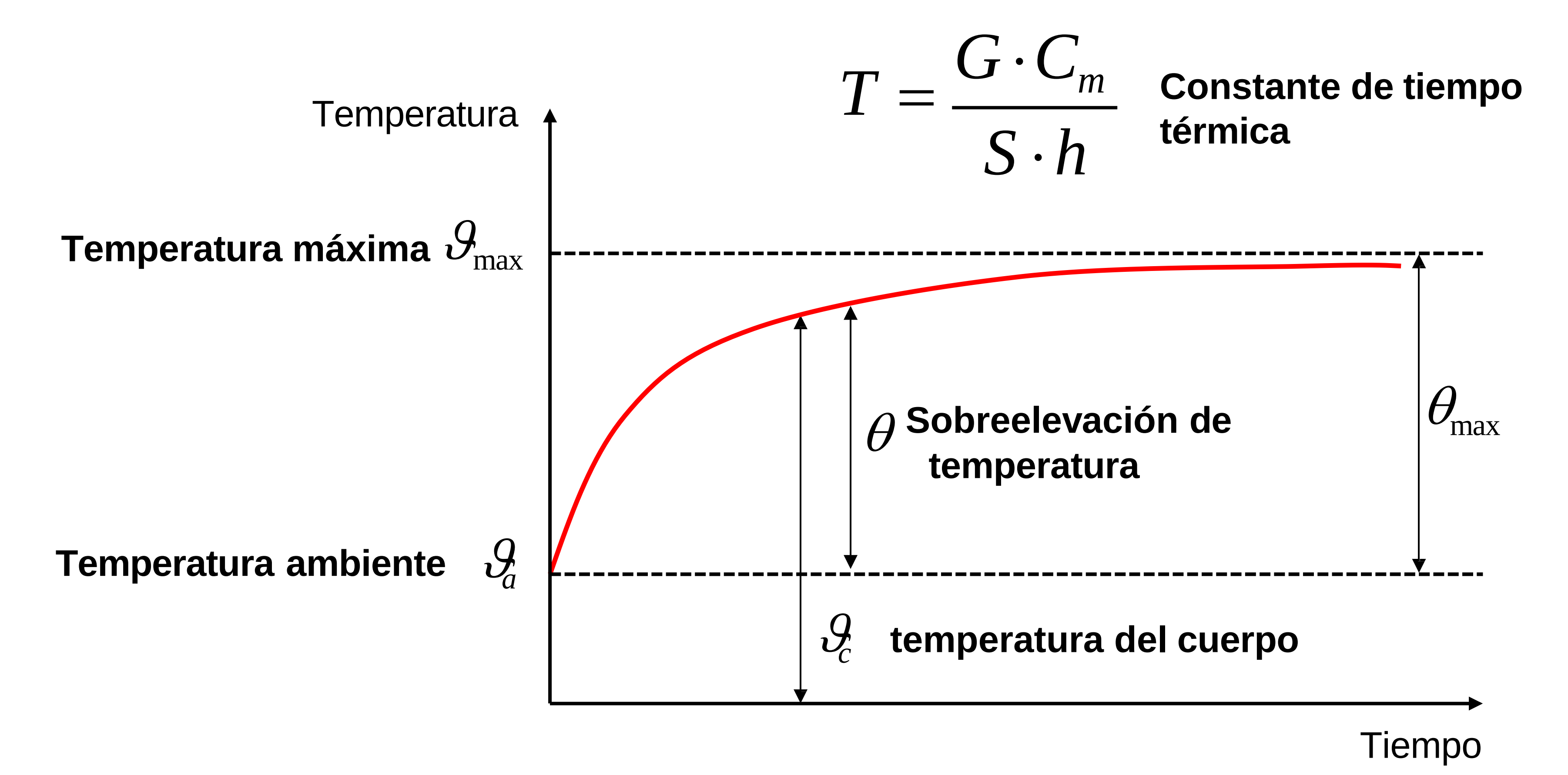
Calentamiento y Enfriamiento

Curva de calentamiento:

$$\theta = \theta_{max}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

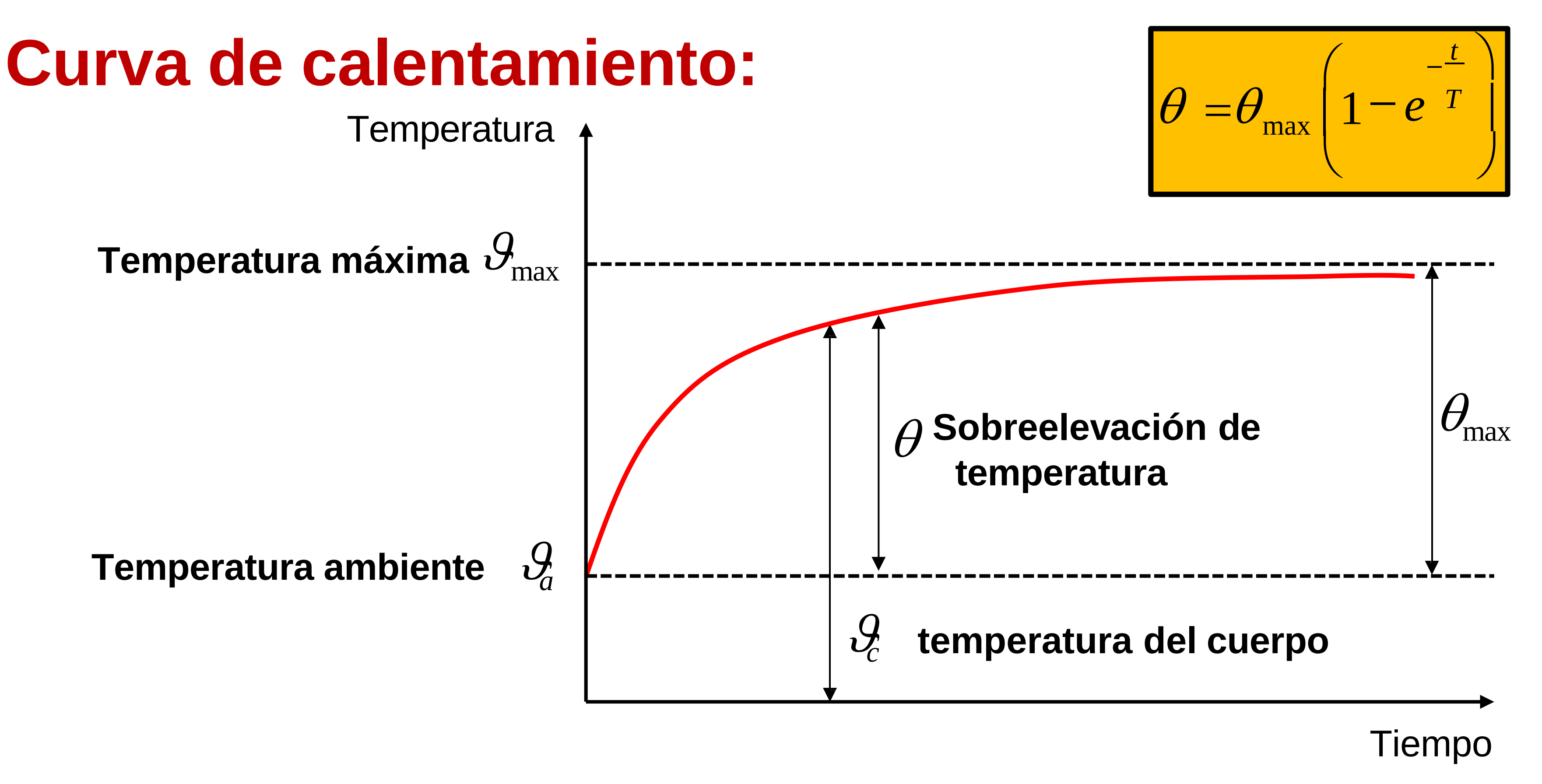
$$T = \frac{G \cdot C_m}{S \cdot h}$$

Constante de tiempo térmica



Calentamiento y Enfriamiento

Curva de calentamiento:



Temperatura máxima ➔ la máxima temperatura que puede soportar el **aislamiento** de una ME en forma continua **sin perjudicarse ➔** se define por norma según tipo de aislante.

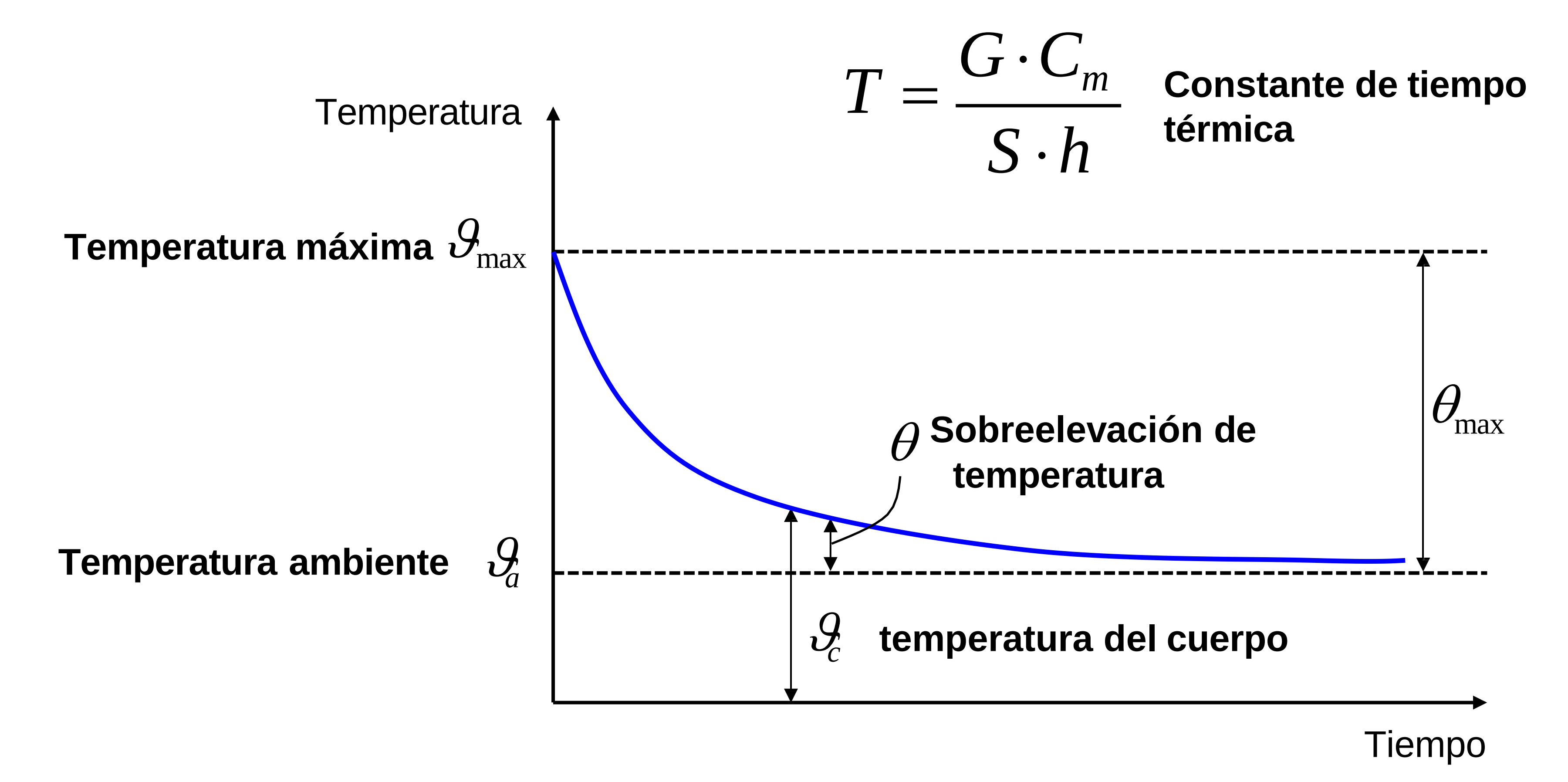
Principios generales de las ME

Calentamiento y Enfriamiento

Curva de enfriamiento:

$$0 = G \cdot C_m \cdot d\theta + S \cdot h \cdot \theta \cdot dt$$

$$\theta = \theta_{max} e^{-\frac{t}{T}}$$



Tipo de Servicio

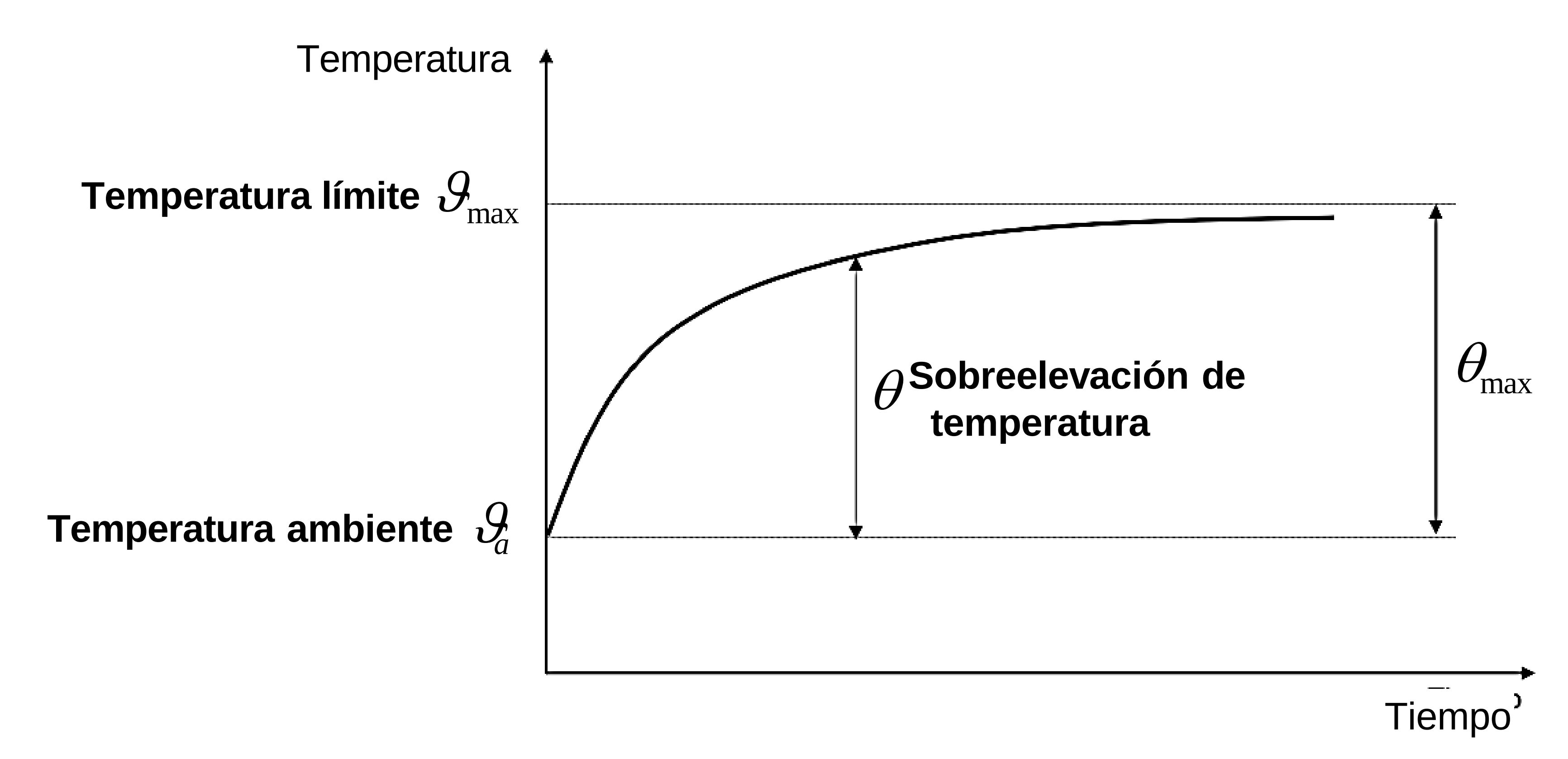
- Una ME puede ser utilizada de diversas formas.
- Se define como los **períodos de funcionamiento en vacío y reposo a los que está sometida la máquina teniendo en cuenta su duración y secuencia de tiempo**.

Los tipos de servicio más comunes son:

- **Servicio continuo.**
- **Servicio temporario.**
- **Servicio intermitente.**

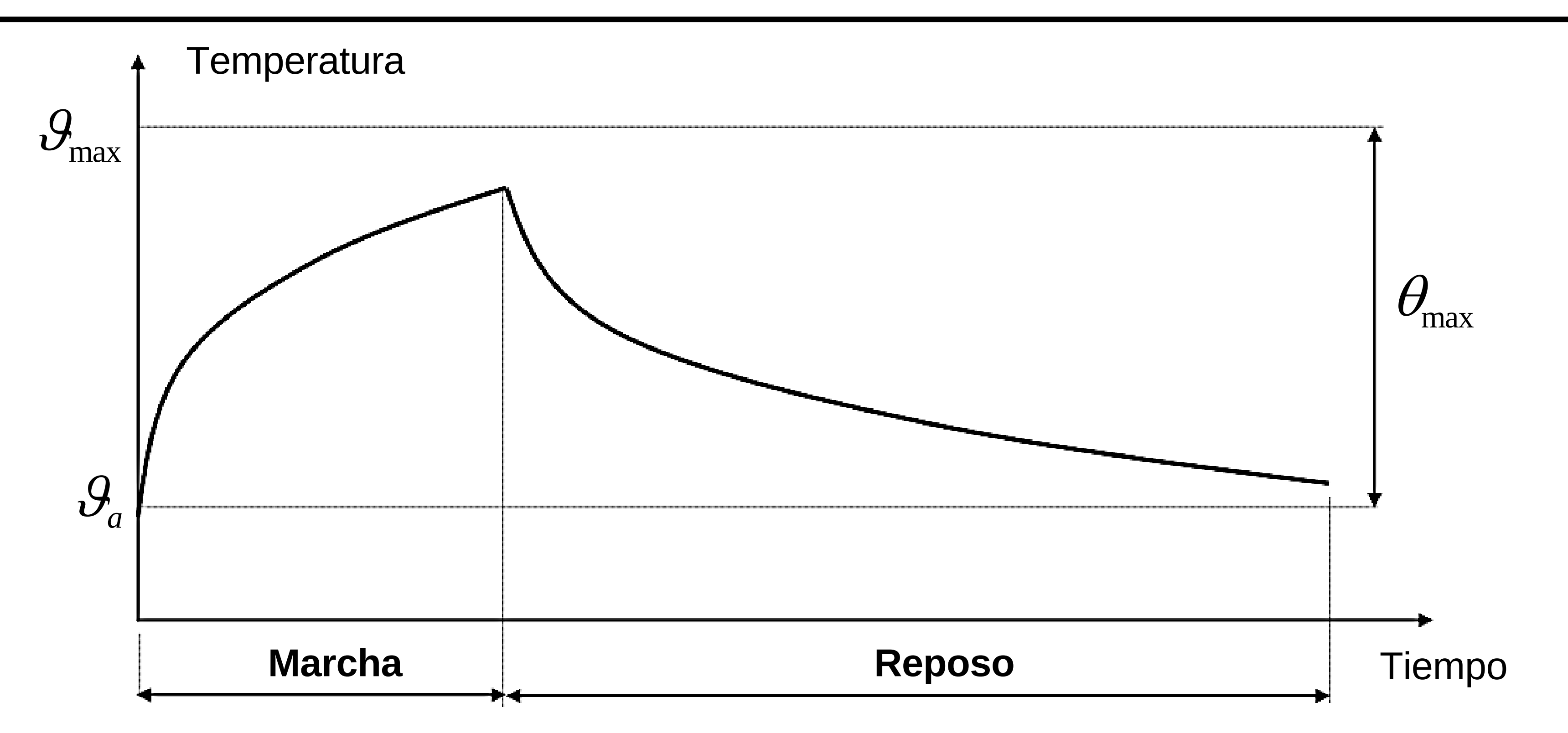
Tipo de Servicio

Servicio continuo: funciona a régimen nominal durante un tiempo ilimitado, llegando la temperatura a la límite (equilibrio térmico).



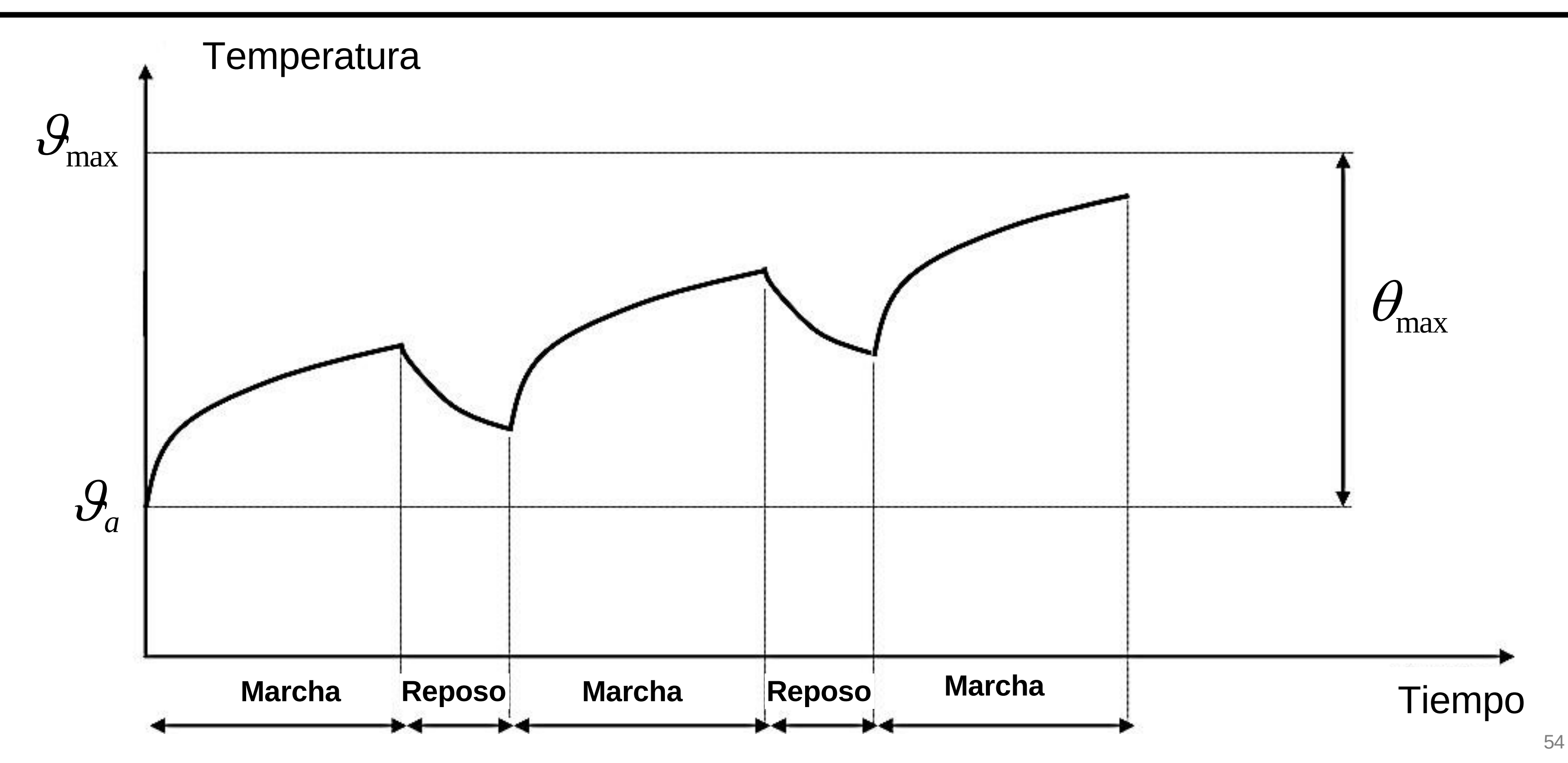
Tipo de Servicio

Servicio temporario: funciona a régimen nominal durante un lapso de tiempo determinado y durante el periodo de **reposo**, su **temperatura desciende a la del medio ambiente**.



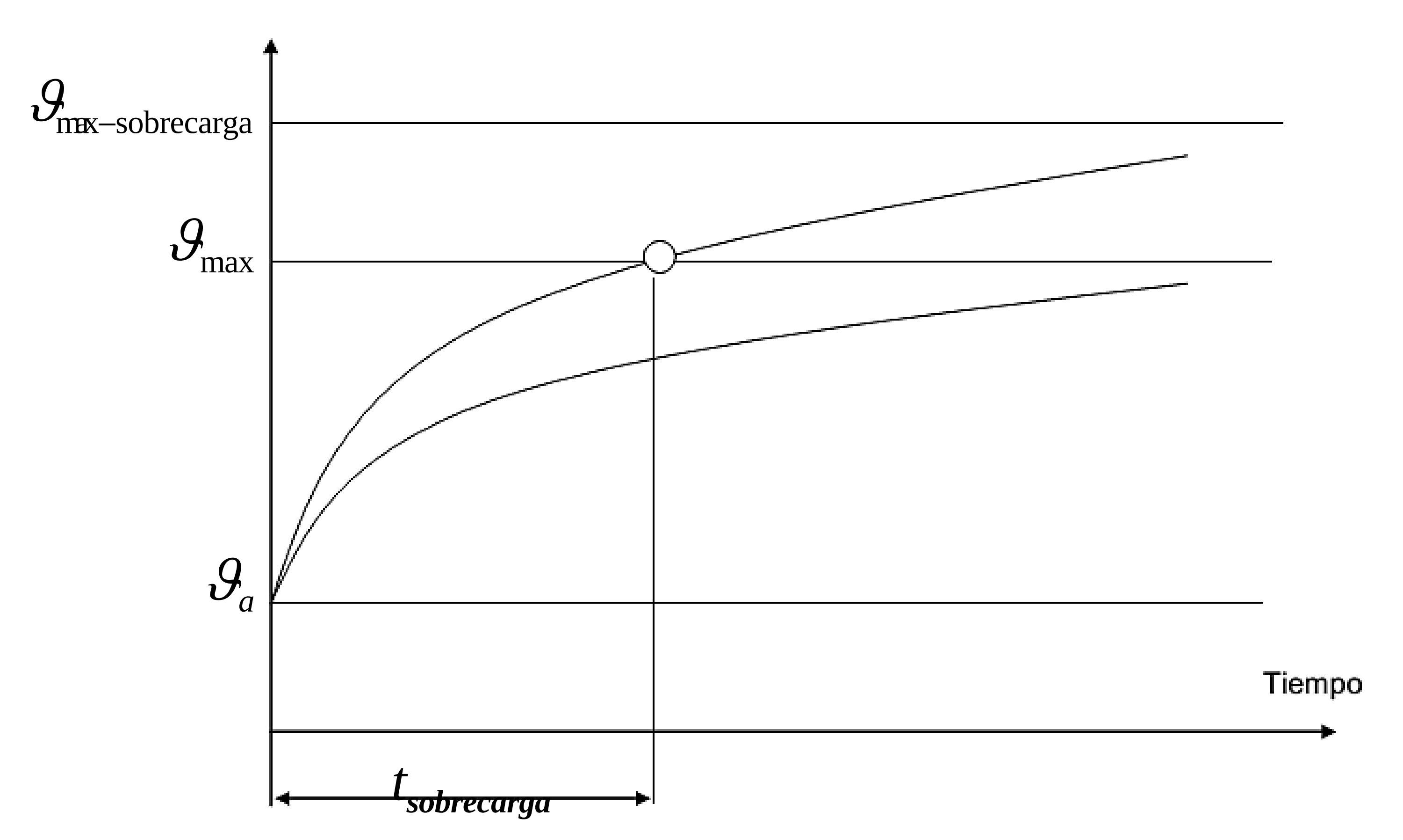
Tipo de Servicio

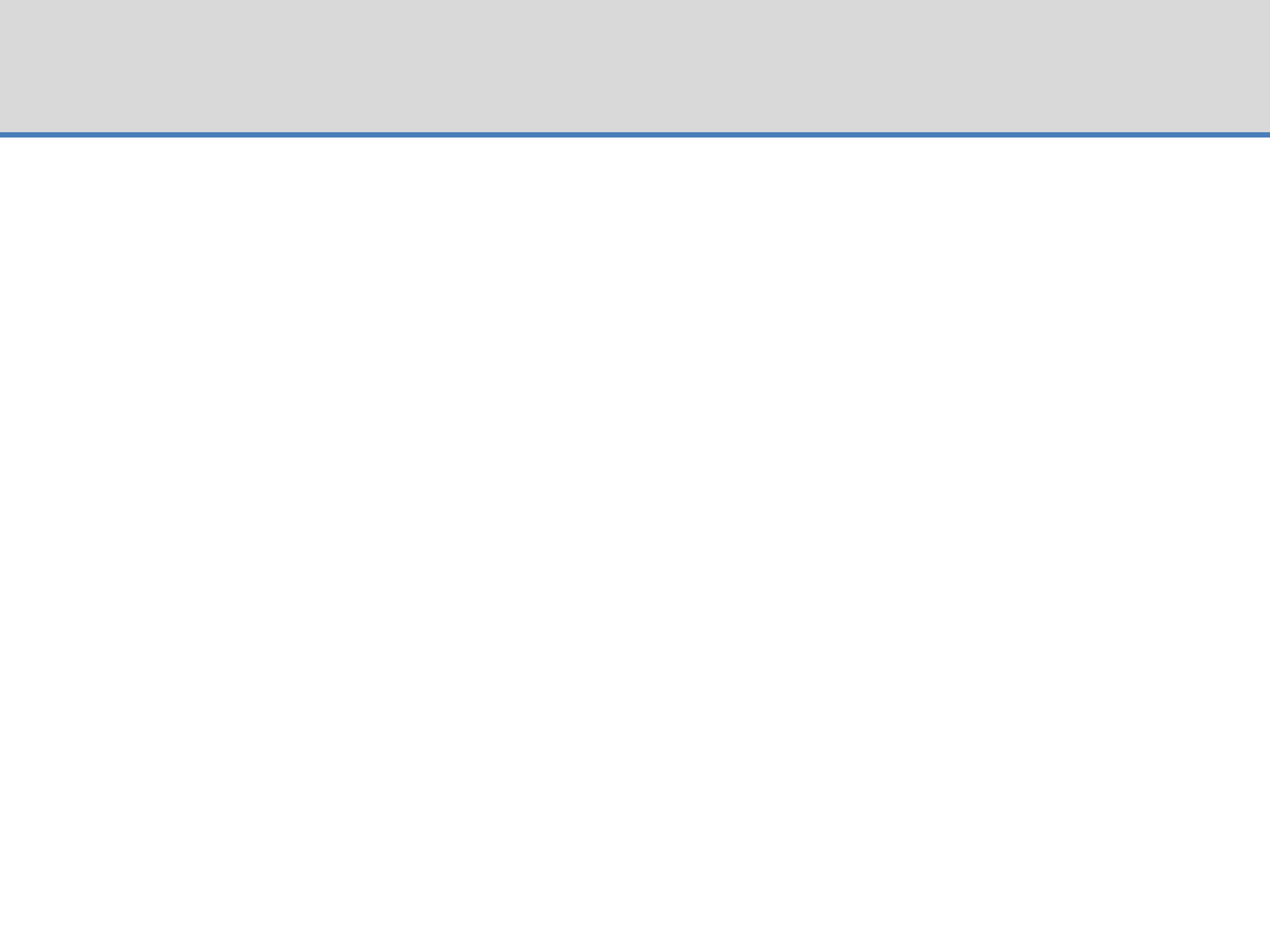
Servicio intermitente: funciona a régimen nominal durante un lapso determinado, seguido de un lapso de **reposo**, también determinado, durante el cual su **temperatura no desciende a la del medio**.



Sobrecarga

- La **ME funcionando en servicio continuo** puede **suministrar por tiempo indeterminado** su potencia nominal.
- La ME puede suministrar, **durante tiempo determinado, una potencia superior a la nominal**.





Referencias

1. Marcelo A. Sobrevila. Ingeniería de la Energía Eléctrica - Libro II. Buenos Aires: Marymar, 1985.
2. Irwing L. Kosow. Máquinas Eléctricas y Transformadores. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1991.
3. Jesús Fraile Mora. Máquinas Eléctricas. España: Mc Graw Hill, 2003.
4. http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/magcur.html#c1
5. Miguel Angel Rodríguez Pozueta – Universidad de Cantabria. Máquinas Eléctricas I – G862, Tema 1, 2016
6. Júlio Álvarez. Pérdidas y calentamiento. UTN, 2009.